Canada

LES SYSTÈMES EXPERTS

RAPPORT Nº 1/85

BUREAU DE L'INNOVATION INDUSTRIELLE

L'innovation

Gouvernement du Canada
Government of Canada
Expansion industrielle régionale
Regional Industrial Expansion

86-01808/

LES SYSTÈMES EXPERTS

Alain Letendre

Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion
industrielle régionale

octobre 1985

PRÉFACE

Ce rapport est le premier d'une série sur les technologies nouvelles à être publié par la Direction de l'évaluation de la technologie du Bureau de l'innovation industrielle.

L'objectif de cette étude est de démystifier la technologie des systèmes experts en informant le public canadien des débouchés, des utilisations, des limites et des défis inhérents à ce domaine survenus ces tout derniers temps.

L'auditoire visé est composé des investisseurs qui pourraient être attirés par le potentiel de croissance phénoménal de ce secteur, ainsi que des firmes canadiennes de logiciels qui pourraient y voir l'occasion de diversifier leurs activités dans un des champs les plus prometteurs de l'intelligence artificielle. Nous voudrions aussi faire prendre conscience aux utilisateurs futurs, le gouvernement y compris, des avantages de l'utilisation des systèmes experts dans les produits et les procédés. A cette fin, cette étude sera largement distribuée au sein de l'auditoire visé.

Dans l'effort qu'elle fait pour promouvoir l'avancement et la diffusion de la technologie, la Direction de l'évaluation de la technologie met particulièrement l'accent sur l'établissement de réseaux d'individus intéressés par ce sujet ainsi que sur la création de liens entre les utilisateurs éventuels et les responsables de la réalisation de ces technologies.

Si le lecteur désirait faire partie d'un tel réseau ou exprimer ses commentaires sur cette étude, il ne devrait pas hésiter à contacter le soussigné.

Les opinions exprimées dans cette étude sont celles de l'auteur et ne sont pas nécessairement endossées par le ministère de l'Expansion industrielle régionale.

Alain Letendre
Bureau de l'innovation industrielle
Ministère de l'Expansion industrielle régionale
Ottawa (Ontario) K1A 0H5

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i

INTRODUCTION 1

1. Objectifs 1
2. Lien avec l'intelligence artificielle 1
3. Définition 2

IMPORTANCE DES SYSTÈMES EXPERTS 3

1. Raisons d'être des systèmes experts 3
2. Marchés 6

UTILISATIONS DES SYSTÈMES EXPERTS 15

1. Conditions de base 15
2. Situations types où utiliser les systèmes experts 15
3. Sortes de problèmes susceptibles d'être résolus ..16
4. Application des systèmes aux machines 17
5. Utilisation des systèmes par fonction 18
6. Utilisation par champ d'activité 24
7. Systèmes utilisés de façon courante 25
8. Diffusion de la technologie 33

TECHNOLOGIE 35

1. Technologie de base 35

    1.1 Structure des systèmes experts 35

        1.1.1 Banque de connaissances 39
        1.1.2 Système à raisonnement par inférence et fonctionnement 47
        1.1.3 Interface homme-machine 51

    1.2 Ordinateurs 51

2. Évaluation de la technologie 58

    2.1 Système expert idéal 58
    2.2 Avantages et utilité des systèmes actuels ...58
    2.3 Rendement 59
    2.4 Limites 60

2.4.1 Limites dues aux formes de représentation 60
2.4.2 Limites reliées à l'acquisition des connaissances 62
2.4.3 Limites dues à la machine à raisonnement par inférence 64
2.4.4 Limites dues aux interfaces pour communiquer avec l'utilisateur 65
2.4.5 Difficultés d'entretien 66
2.4.6 Autres difficultés 66
2.4.7 Conclusion 66

2.5 R. et D. nécessaire 67
2.6 Le futur 68

2.6.1 Technologie 68
2.6.2 Applications 70
2.6.3 Répercussions sociales 71

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME EXPERT 73

1. Processus 73
2. Outils pour faciliter l'élaboration 74
3. Degré d'effort requis 79
4. Conseillers 80

ACTIVITÉS A L'ÉTRANGER 87

1. États-Unis 87

1.1 Activités gouvernementales 87
1.2 Activités universitaires 88
1.3 Activités dans le secteur privé 89

2. Japon 90

3. Europe 91

3.1 Grande-Bretagne 94
3.2 République fédérale d'Allemagne 95
3.3 France 96
3.4 Hollande 97
3.5 Autres 97

ACTIVITÉS CANADIENNES 99

1. Activités au niveau fédéral 99
2. Activités au niveau provincial.....100
3. Recherche universitaire 100
4. Activités dans l'industrie 102
5. Autres activités du secteur privé 102
6. Associations 103

BIBLIOGRAPHIE 109

SOMMAIRE

Cette étude, qui se veut une revue générale des systèmes experts, a pour objectif d'accroître le niveau de connaissance des industriels canadiens sur cette technologie et de les informer des débouchés, des utilisations, des limites et des défis inhérents à ce domaine survenus ces tout derniers temps.

On peut définir les systèmes experts comme des logiciels pouvant résoudre des problèmes d'un degré de difficulté tel, que normalement, on ferait appel à un expert humain. Ils peuvent donc, selon le cas, remplacer ou aider un expert. En d'autres termes, ce sont des programmes qui visent à automatiser certaines fonctions intellectuelles. Enfin, il faut ajouter qu'ils seront de plus en plus utilisés pour doter d'une certaine intelligence diverses machines comme les robots ou les instruments de laboratoire, pour ne donner que deux exemples.

Contrairement aux logiciels conventionnels qui sont basés sur des algorithmes, les systèmes experts utilisent un mécanisme appelé machine à raisonnement par inférence pour dépouiller, traiter et interpréter le contenu d'une banque de données regroupant des connaissances se rapportant à un domaine particulier. Celles-ci comprennent des faits, des modèles et surtout des heuristiques, c'est-à-dire les règles de bon jugement qui caractérisent l'approche et la façon de travailler d'un expert. Un exemple d'heuristique applicable au jeu de tic-tac-toe serait : " Si vous êtes le premier joueur, indiquez votre marque au centre du jeu ".

L'intérêt suscité par ces systèmes experts se situe sur deux plans. Tout d'abord, l'industrie de l'informatique envisage un marché mondial qui pourrait atteindre plus de 1,2 milliard de dollars (US) dans cinq ans. Ensuite, les utilisateurs stimulent la demande parce qu'ils réalisent que le potentiel de ces systèmes leur permettra de récupérer leur mise de fonds très rapidement. Les pages 4 à 6 donnent quelques exemples concrets de bénéfices obtenus.

Les systèmes experts sont utilisables dans tous les cas où un grand nombre de données doivent être analysées ou quand la solution à un problème ne peut être représentée par un algorithme. Toutefois, la solution du problème ne devra jamais faire appel au gros bon sens.

L'argent investi dans un tel système sera récupéré d'autant plus rapidement s'il est utilisé dans un domaine à forte intensité de capital où les experts sont rares et où les coûts d'équipement non utilisé sont relativement élevés. Voici quelques exemples de situations particulièrement propices à l'utilisation de systèmes experts. S'il n'y a pas d'expert sur place et qu'un conseil doit être donné rapidement (p. ex. un foret se casse lors du forage d'un puits de pétrole); si la situation évolue trop rapidement et devient trop stressante pour un être humain (p. ex. une urgence dans une centrale nucléaire); ou encore, si certains spécialistes quittent l'entreprise et qu'on ne peut facilement leur trouver de remplaçants.

Les systèmes actuels ont été utilisés pour un grand nombre de fonctions (de l'analyse et de l'interprétation de données à la formulation de concepts et à la planification). Les domaines d'utilisation touchent tous les secteurs : prospection minérale et pétrolière, médecine, génie, chimie et biotechnologie, mathématiques, marketing, agriculture, droit, comptabilité et bien d'autres.

Il est bon ici de rappeler que cette technologie vient tout juste de commencer à être commercialisée, que la plupart des systèmes en sont encore au stade expérimental et qu'on commence à peine à en utiliser certains de façon routinière. A de rares exceptions près, ces systèmes sont très dispendieux car ils sont conçus et mis au point " sur mesure " pour répondre aux besoins précis d'un client donné.

Toutefois, trois tendances se dessinent au niveau de la commercialisation; celles-ci généreront une croissance explosive du nombre de systèmes en utilisation. Premièrement, des systèmes très simples et peu dispendieux, qui pourront fonctionner sur ordinateur personnel, sont en cours de mise au point. Bien que leur potentiel soit limité, ils peuvent présenter une utilité certaine. Deuxièmement, on verra très bientôt apparaître sur le marché des progiciels des systèmes experts importants qui seront vendus en très grand nombre afin d'amortir les frais de conception et de mise au point. Ainsi, même ces gros systèmes seront à la portée des petites et moyennes entreprises. Enfin, pour qui veut élaborer son propre système, des squelettes de systèmes experts sont maintenant vendus par les principaux conseillers et producteurs spécialisés dans ce domaine. Ces squelettes sont des systèmes experts dont la banque de données est vide et à laquelle il suffit d'ajouter les connaissances d'un domaine donné pour obtenir un prototype fonctionnel.

Pour qui serait tenté de se lancer dans la création d'un système expert d'importance, il faut rappeler que l'investissement peut être élevé, que les spécialistes sont peu nombreux, que les ordinateurs utilisés sont relativement dispendieux, que les langages de programmation utilisés sont peu connus en dehors du cercle des spécialistes et, enfin, que ces systèmes sont encore sérieusement limités dans certains cas.

Ceci étant dit, il faut se rappeler que les systèmes experts représentent une des premières applications commerciales de l'intelligence artificielle et que les possibilités d'utilisation sont telles que des firmes comme Northern Telecom, Générale Électrique et GM se sont lancées dans l'élaboration de systèmes pour utilisation interne. Enfin, le rythme de croissance de cette technologie est absolument phénoménal. En fait, on devrait bientôt assister à une croissance exponentielle de petits systèmes fonctionnant sur ordinateur personnel ou de ceux incorporés dans des machines, comme les instruments scientifiques.

Jusqu'à maintenant, les États-Unis ont sans contredit été les leaders dans le domaine, suivis de près par l'Europe. Le Japon, d'autre part, a investi des sommes énormes pour tenter d'accéder à cette première place; ceci a poussé les autres gouvernements à créer de coûteux programmes pour favoriser ces technologies.

Au Canada, l'activité universitaire dans ce domaine est au moins aussi intense que dans la plupart des pays européens, toute proportion gardée. Du côté du secteur privé, de nombreuses firmes de conseillers et de producteurs de logiciels se sont lancées dans le domaine et entreprennent de plus en plus d'élaborer leurs propres systèmes experts. Cette tendance n'est cependant pas aussi marquée qu'à l'étranger. Au sein même du gouvernement, de nombreux ministères ont manifesté un intérêt certain pour cette technologie, ce qui devrait faire augmenter de façon marquée la demande pour les produits et services qui y sont rattachés.

INTRODUCTION

1. Objectifs

Ce rapport, qui se veut une revue générale des systèmes experts, a pour objectif de démystifier ce domaine et d'informer les industriels canadiens des débouchés, des utilisations, des limites et des défis inhérents à cette technologie. Ainsi cette étude pourra peut-être indirectement faciliter la diffusion des systèmes experts et susciter l'intérêt d'éventuels investisseurs.

2. Lien avec l'intelligence artificielle

Les systèmes experts sont une des premières applications commerciales de l'intelligence artificielle. Les autres applications commerciales de l'intelligence artificielle se font dans le domaine du langage naturel (langages humains et non pas langages formels comme ceux utilisés en informatique), de l'enseignement assisté par ordinateur, des systèmes de reconnaissance visuelle, de la robotique et de la productique ainsi que des systèmes de reconnaissance de la parole. Il est à noter que la démarcation entre ces divers domaines n'est pas toujours clairement définie.

Selon certains auteurs, le domaine des systèmes experts sera celui dont le taux de croissance sera le plus élevé au cours des cinq prochaines années. Ce qui est certain, c'est que c'est l'un des domaines qui fait le plus parler de lui.

Il faut aussi noter que le principe de base des systèmes experts repose sur l'utilisation d'une grande somme de connaissances pratiques. Ce principe constitue aussi la nouvelle philosophie de l'intelligence artificielle qui a abandonné, du moins temporairement, l'idée d'élaborer une théorie générale de l'intelligence basée sur un algorithme unique de résolution de problèmes. Cette philosophie suppose donc que l'intelligence est plutôt basée sur une énorme quantité de connaissances allant de principes de base (p. ex. qu'un objet tombe vers le sol s'il est laissé en suspens dans les airs) aux principes scientifiques les plus complexes, sans oublier les aspects moins concrets comme les croyances et les attentes.

3. Définition

Feigenbaum, un des pionniers dans le domaine, a défini les systèmes experts de la façon suivante :

> Un système expert est un programme d'ordinateur intelligent qui utilise des connaissances et des procédures de raisonnement par inférence pour résoudre des problèmes qui sont d'un niveau de difficulté tel qu'il est nécessaire de faire appel à l'expertise humaine pour les résoudre.
>
> (Feigenbaum et McCorduck)

Cette définition nous éclaire sur la différence primordiale qui existe entre les systèmes experts et les programmes d'ordinateur ordinaires. Ces derniers sont basés sur une transcription algorithmique : ils indiquent de façon détaillée à l'ordinateur les étapes à suivre pour arriver à une solution. En d'autres termes, le programme fonctionnera toujours de façon invariable.

Les systèmes experts, par contre, utilisent leurs connaissances de façon variée suivant le problème à résoudre. Une section sur la technologie des systèmes experts (page 47) détaillera leur fonctionnement.

Les connaissances utilisées dans les systèmes experts comprennent des faits, des modèles et des heuristiques.

Les faits constituent l'ensemble des connaissances communes à un cercle d'expert, qui sont du domaine public et sur lesquelles les experts dans le domaine sont d'accord.

Les heuristiques sont des règles de bon jugement, c'est-à-dire des règles de raisonnement plausible permettant d'évaluer ou de deviner. Ces règles, dont on parle peu et qui sont souvent personnelles, caractérisent l'approche et la façon de travailler d'un expert dans un domaine particulier. Une telle règle pour le jeu de tic-tac-toe serait : " Si vous êtes le premier joueur, indiquez votre marque au centre du jeu ". Une autre, qui pourrait être utilisée pour découvrir de nouvelles lois, serait de considérer en priorité les cas extrêmes.

Les heuristiques sont une façon intéressante de contourner le problème de la rapide multiplication des combinaisons à considérer dans certains problèmes. Ainsi, aux échecs, par exemple, le problème du roi et du cavalier contre le roi et la tour, comprend deux millions de possibilités. Ce problème particulier peut être résolu à l'aide de seulement 30 règles.

IMPORTANCE DES SYSTÈMES EXPERTS

1. Raisons d'être des systèmes experts

Jusqu'à tout récemment, seuls les secteurs primaires et secondaires étaient susceptibles d'être automatisés. Dans l'avènement de l'intelligence artificielle, on a vu, à tort ou à raison, l'aube d'une nouvelle révolution où certaines formes de travail intellectuel pourraient commencer à être automatisées. (A. Letendre 1983)

Les systèmes experts se veulent une solution aux problèmes généralement associés aux connaissances, car celles-ci sont éphémères, spécialisées et difficiles à appliquer.

Un autre problème est relié à nos organisations mêmes. Ainsi, par exemple, si un employé est promu à un poste de niveau plus élevé après avoir acquis de l'expérience dans un poste, l'entreprise verra cette expérience perdue en ce qui a trait au fonctionnement du poste précédent. Un autre exemple est celui des spécialités qui ne se retrouvent que dans certaines catégories d'employés sur le point de prendre leur retraite, p. ex. les ferblantiers. Souvent, cette expérience est perdue lorsque l'employé quitte son poste puisqu'il n'y a pas de relève.

Nous pourrions aussi mentionner qu'aucune personne ne peut aspirer à exceller dans plusieurs champs d'activité; les systèmes experts actuels subissent d'ailleurs eux aussi ces contraintes.

Les systèmes experts pourraient solutionner les problèmes que les moyens informatiques traditionnels ne permettent pas de traiter. Ils assureront certainement la préservation et la distribution d'une vaste gamme de spécialités. Ainsi, on amplifiera la valeur des experts en mettant leur expertise à la disposition de tous. Ce sera l'avènement d'un nouveau Gutenberg.

A plus court terme, ces systèmes experts seront utilisés pour gérer l'information, conseiller les professionnels, agir comme assistants électroniques en conseillant, par exemple, un chirurgien sur la meilleure tactique à adopter dans une intervention chirurgicale ou en l'avertissant que des contradictions existent entre ses hypothèses et les connaissances généralement acceptées.

Grâce à quelques exemples, nous allons montrer quelle est l'utilité de ces systèmes experts. Ces exemples proviennent tous de l'ouvrage de Feigenbaum et McCorduck, The Fifth Generation - Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World.

- Des spécialistes du Stanford Research Institute International, en collaboration avec des scientifiques du U.S. Geological Survey, ont construit PROSPECTOR, un système de consultation en géologie. Bien que le programme possède de nombreuses connaissances générales en géologie et en minéralogie, il a aussi des connaissances plus précises sur des régions particulières comme le bassin du Mississippi et les principales chaînes de montagnes américaines. En 1982, le système a été utilisé par une compagnie qui faisait de la prospection dans l'état de Washington et a conduit à la découverte d'un gisement estimé à quelques 100 millions de dollars. On connaissait auparavant ce gisement, mais non son étendue.

- Une importante compagnie américaine a élaboré un système expert pour diagnostiquer les défaillances dans des usines de génération d'électricité mues par des turbines à vapeur, le diagnostic étant basé sur une analyse chimique des effluents. En 1981, le prototype établissait avec succès, en quelques minutes, un premier diagnostic alors qu'il a fallu aux experts de l'usine plusieurs jours pour arriver à cerner le problème. Les opérations de l'usine avaient été arrêtées pendant quatre jours, ce qui avait occasionné des pertes de 1,2 million de dollars.

- La compagnie française Elf Aquitaine loue habituellement des services de forage aux compagnies pétrolières. Cette compagnie aimerait avoir un ou plusieurs de ses experts sur les lieux du forage en tout temps car les erreurs possibles sont coûteuses, aussi bien en temps qu'en argent. Par exemple, des puits qui ont coûté quelques millions de dollars ont dû être abandonnés à cause d'erreurs faites en essayant de solutionner des problèmes de forage. Elf Aquitaine a donc chargé la compagnie Teknowledge, aidée d'un spécialiste de Elf, de construire DRILLING ADVISOR. Ce système diagnostique une variété de problèmes de forage, recommande des mesures correctives et indique quelles sont les mesures préventives à prendre afin que le problème ne se pose plus. Pour comprendre l'intérêt que représente un tel système, il suffit de se rappeler que le retard d'un expert peut facilement coûter 100 000 $ par jour.

- La compagnie Hitachi met présentement au point un système spécialisé dans la gestion d'une chaîne de fabrication de circuits intégrés. (Il semble que la compagnie Northern Telecom mette indépendamment au point un système similaire). Dans ce domaine, les rendements sont souvent faibles, ce qui a une répercussion directe sur les profits. Si les rendements baissent de façon significative, les experts en fabrication peuvent parfois mettre plusieurs jours avant de corriger le problème. Même si le système expert ne rectifiait que partiellement le problème, des millions de dollars pourraient être épargnés chaque année.

- Dans le domaine de la biotechnologie, bien que des outils puissants soient à la disposition des chercheurs pour déterminer les séquences de base, le procédé peut être long, difficile et susceptible de comporter des erreurs. IntelliGenetics, une petite entreprise fondée par M. Feigenbaum, a créé un système expert qui assiste les biologistes et les généticiens dans l'analyse des séquences et dans l'interprétation des résultats expérimentaux. Ce système, qui est disponible dans le commerce, augmente non seulement la productivité des rares spécialistes en biotechnologie, mais est aussi plus efficace que les experts humains.

- La compagnie Cognitive Systems de New Haven, Connecticut, a conçu COURTIER, un système de consultation sur le choix d'un portefeuille d'actions devant bientôt être installé dans les halls d'entrée des succursales d'une grande banque belge. COURTIER questionnera le client afin d'obtenir des informations sur sa situation financière. Ensuite, d'après le portefeuille actuel du client, les meilleures techniques d'évaluation des investisements, les pratiques usuelles du pays et les conditions courantes du marché, COURTIER émettra des recommandations sur l'achat ou la vente d'actions. Le fonctionnement du système pourra être interrompu à tout instant pour permettre au client d'exprimer son opinion sur les recommandations ou de demander un conseil sur les investissements en général.

- Cependant, le système le plus connu est sans contredit celui créé par Digital Equipment Corporation, une compagnie fabriquant des mini-ordinateurs, qui assemble sur mesure chaque ordinateur pour se conformer aux besoins de chacun de ses clients. Étant donné le grand nombre de modules devant être assemblés pour chaque machine, et ce, en se soumettant à de nombreuses contraintes et conditions, à peu près 20 % des systèmes présentaient des problèmes.

Un système expert, EXCON (EXpert CONfigurer), a été conçu pour conseiller le personnel de Digital Equipment en ce qui concerne la conception sur mesure des modèles des ordinateurs de la compagnie. Le système est utilisé de façon régulière depuis 1980 et vérifie chaque commande soumise par les vendeurs. Le système vérifie d'abord si la version choisie est complète et réalisable en ce qui a trait au type et la longueur des câbles, aux composantes, à la capacité de la mémoire et ainsi de suite. Le système recommande ensuite certains ajouts ou corrections, puis imprime un rapport qui aide le personnel de fabrication à assembler correctement l'ordinateur.

On dit que ce système a un taux de réussite de 99 % et que la compagnie évite ainsi des erreurs coûteuses. Cependant, puisque des erreurs se produisent lors de la commande et qu'il est moins coûteux d'y remédier à ce stade, la compagnie a déjà commencé à travailler sur un système expert, EXSEL (EXpert SELling assistant) pour son équipe de vente. EXSEL aidera l'équipe de vente de Digital Equipment à définir le modèle le plus susceptible de répondre aux besoins du client, à estimer les besoins associés à la préparation des lieux ainsi que les dates de livraison.

Évidemment, personne ne sait avec certitude quelles sont les retombées économiques de l'utilisation d'EXCON, pour Digital Equipment. Cependant, dans le milieu de l'intelligence artificielle, on dit que la compagnie épargne ainsi quelques 20 millions de dollars US par année. Il est certain que le système est rentable, sinon comment expliquer que Digital Equipment se soit par la suite lancée dans la mise au point d'un autre système devant compléter EXCON.

2. Marchés

L'intelligence artificielle est une technologie qui est fraîche émoulue des laboratoires. En conséquence, toute prévision de marché n'est qu'une estimation très sommaire. De plus, les données disponibles sur les marchés actuels se contredisent souvent. Par conséquent, cette section n'est tout au plus qu'indicative.

D'après DM Data Inc., le marché nord-américain des produits et services reliés à l'intelligence artificielle pourrait atteindre 719 millions de dollars US en 1985 (Tableau I). Une forte proportion de ce marché est détenue par la vente d'ordinateurs conçus spécialement pour les langages utilisés en intelligence artificielle.

Si on exclut la vente de ces ordinateurs et des langages qui y sont associés, le marché nord-américain pour les applications de l'intelligence artificielle à divers domaines s'élève à 358 millions de dollars US (Tableau II). Les systèmes de reconnaissance visuelle (utilisés surtout en robotique ou en inspection automatisée) représentent 47 % du marché. Les systèmes experts viennent en deuxième place avec 18 %, tout comme les programmes de langage naturel qui sont actuellement utilisés comme interfaces permettant de questionner les banques de données. D'ailleurs, quiconque a déjà essayé d'utiliser un programme comme le fameux DBase II comprendra l'attrait d'une interface d'utilisation plus facile.

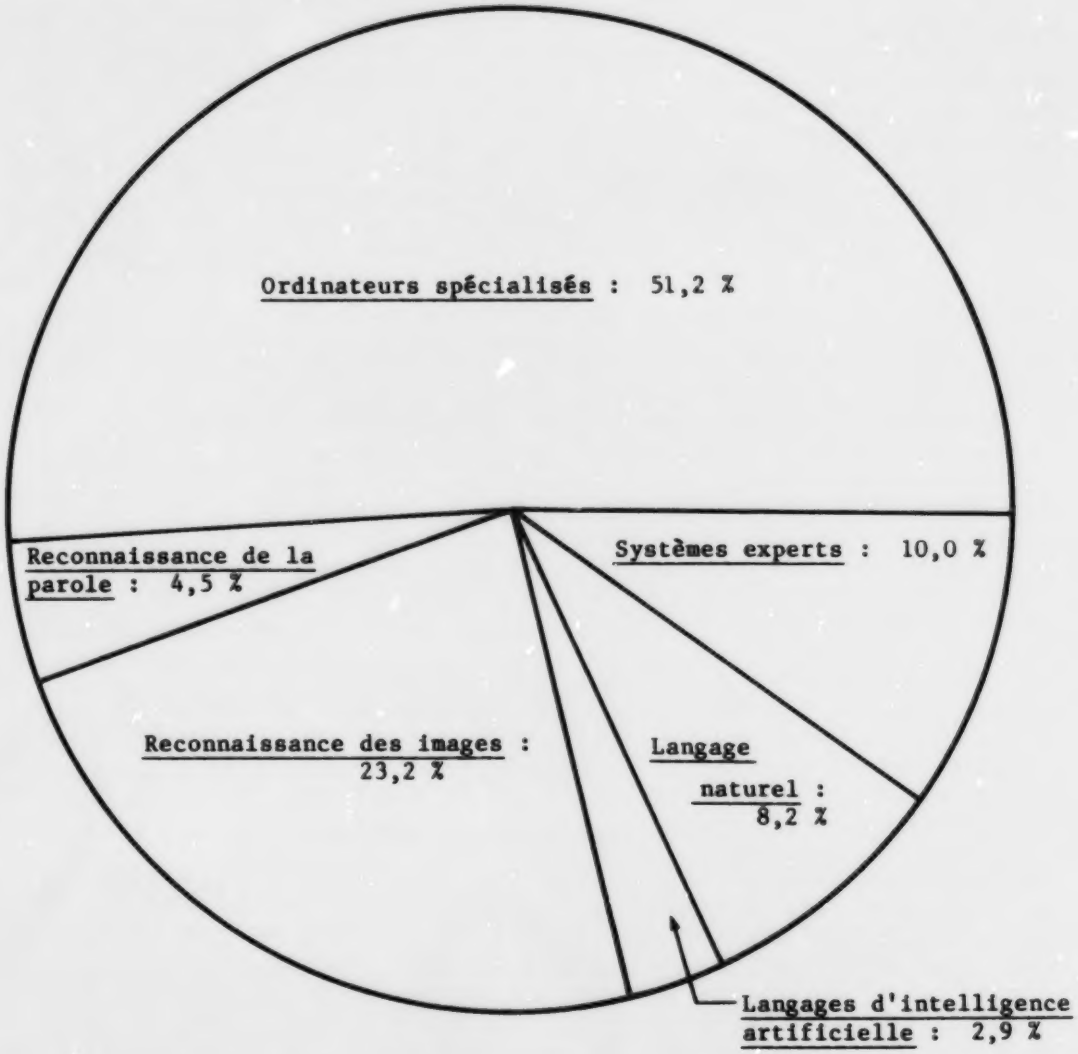
Plusieurs analystes s'entendent pour prédire que le marché des biens et services dans le domaine de l'intelligence artificielle pourrait connaître une période de forte croissance à partir de 1986.

Des terminaux commandés par la voix, des robots capables de reconnaître des formes complexes dans un milieu structuré et des conseillers électroniques ne sont que quelques-uns des nouveaux produits qui pourraient faire leur apparition sur les marchés d'ici 6 à 7 ans.

Tel que le montre le tableau III, alors qu'une forte proportion du marché actuel est occupée par la vente de services (surtout de la consultation), le marché de 1993 comprendra principalement des logiciels. La vente d'équipement se maintiendra et le secteur des services subira une nette régression.

Selon le tableau IV, on estime que la totalité du marché mondial pour les produits de l'intelligence artificielle sera de quelque 4 milliards de dollars US en 1990 et que celui des services atteindra 1,2 milliard la même année. Il est opportun de noter ici que chaque nouvelle étude ajuste, à la hausse, les prévisions des études précédentes. Par exemple, A.D. Little Inc. prévoit un marché mondial de 11 milliards de dollars US pour 1990 (soit 4,5 % du marché de l'informatique) et un total de quelque 100 000 années-personnes.

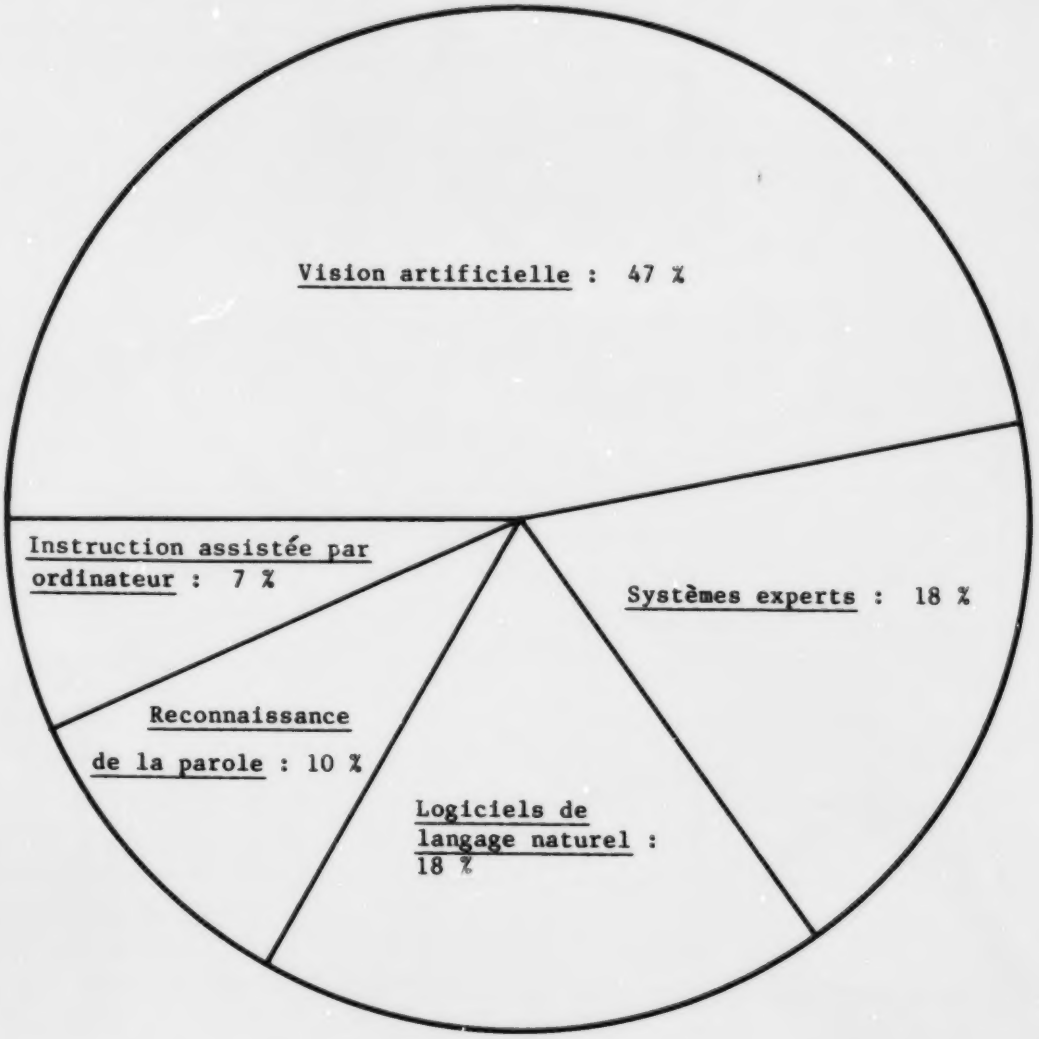
Le marché des systèmes experts sera en pleine expansion avec un taux de croissance de 86 % par année au cours des cinq prochaines années et des ventes de 1,2 milliard de dollars en 1990; ceci représentera un peu plus du quart du marché total des biens et services en intelligence artificielle. La revue AI Trends publiait, en mars 1985, un diagramme éloquent de ce secteur indiquant que le marché américain atteint déjà 73,7 millions de dollars US (Tableau V).



Total : 719 millions de dollars US

Tableau 1. Marché total de l'intelligence artificielle par produit pour 1985

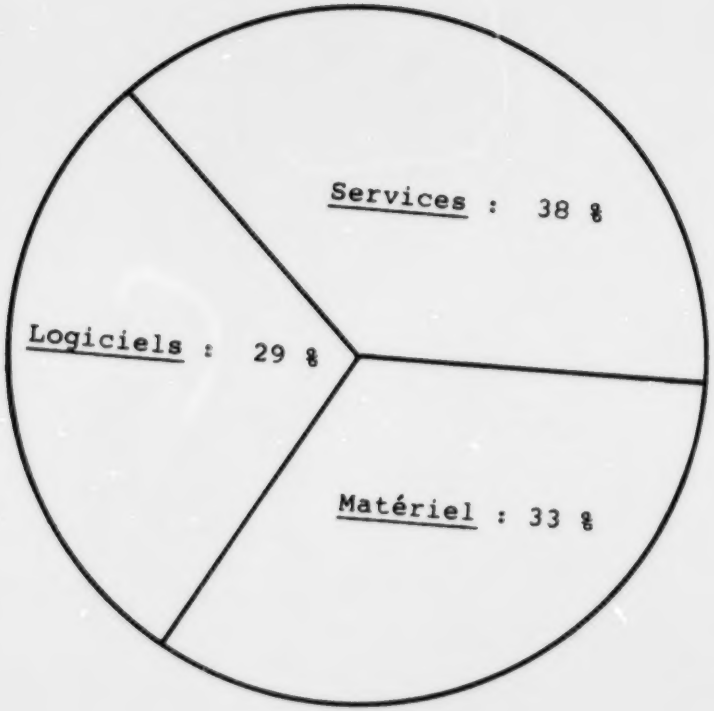
(Source : AI Trends '85.)



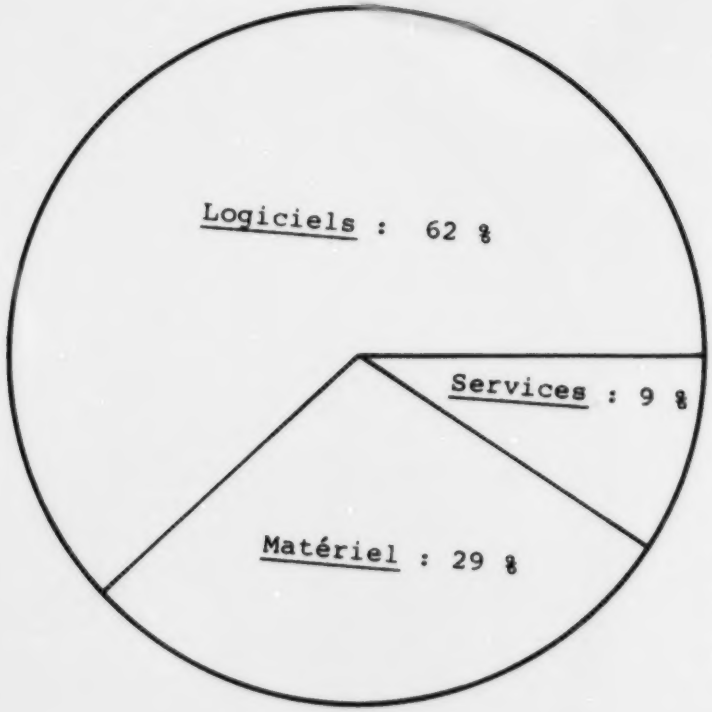
Total : 358 millions de dollars US

Tableau II. Répartition des ventes pour chaque segment du marché des utilisations de l'intelligence artificielle (1985)

(Source : AI Trends, mars 1985)



1983



1993

Tableau III. Marchés pour les produits et services de l'intelligence artificielle

(Source : Commercial Products Begin to Emerge from Decades of Research, Electronics, 3 novembre 1983, p. 128.

Alors qu'il y a seulement quelques années, l'utilisation des systèmes experts était concentrée dans le domaine militaire et du diagnostic, il semble que les applications de ces systèmes aux domaines financier et manufacturier soient en pleine expansion (Tableau VI).

En conclusion, il est bon de souligner que les systèmes experts génèrent présentement autant d'intérêt dans les milieux des capitaux de risque que la biotechnologie à la fin des années 70 et au début des années 80.

Segment	1983	1987	1990	Taux de croissance (%)
Systèmes experts	16	800	1 243	86
Langage naturel	18	190	1 090	79
Enseignement assisté par ordinateur	7	30	100	46
Reconnaissance visuelle	30	230	860	60
Reconnaissance de la parole	10	50	230	56
Équipement	25	200	500	54
Marché total	106	1 500	4 023	68

Tableau IV. Marché mondial de l'intelligence artificielle (en millions de dollars).

(Source : Electronics Week, 12 novembre 1984)

PART DU MARCHÉ PAR COMPAGNIE	1982	1983	1984	1985
AI Research Group			0,2	1,0
Advanced Information & Decision Syst.	1,8	2,7	3,9	6,0
Applied Expert Systems (APEX)		-	2,0	4,0
Artelligence Inc.			-	0,1
Brattle Research			0,6	1,0
Carnegie Group			2,1	7,0
California Intelligence			-	0,1
Computer*Thought		0,5	0,8	1,0
Digital Equipment Corp.			0,2	2,0
Expertelligence			-	0,1
Expert-Knowledge Systems Inc.			-	0,8
General Research		0,1	0,3	1,0
Iconics	1,0	1,0	2,0	4,0
Inference Corp.		0,2	1,0	2,0
Intellicorp	0,4	1,5	2,1	3,5
Intelligent Software Inc.			0,1	0,2
Jeffrey Perrone & Assoc.			0,1	0,2
Migent Software Inc.				-
Palladian			-	0,1
Perceptronics		2,0	4,0	10,0
Radian Corp.			-	0,3
Reasoning Systems Inc.				-
Smart Systems Technology	0,3	1,0	2,0	3,0
Software Architecture & Engr.	1,3	2,0	2,5	5,0
Syntelligence		0,1	1,5	2,0
Systems Control Technology (STC)	0,5	1,0	1,3	1,3
Teknowledge Inc.	1,5	2,2	3,0	5,0
Verac Inc.			1,5	3,0
Autres	2,5	3,0	7,0	10,0
TOTAL	9,3	17,3	38,2	73,7

Tableau V. Part du marché américain, par compagnie, pour les systèmes experts.

(Source: AI Trends, mars 1985.)

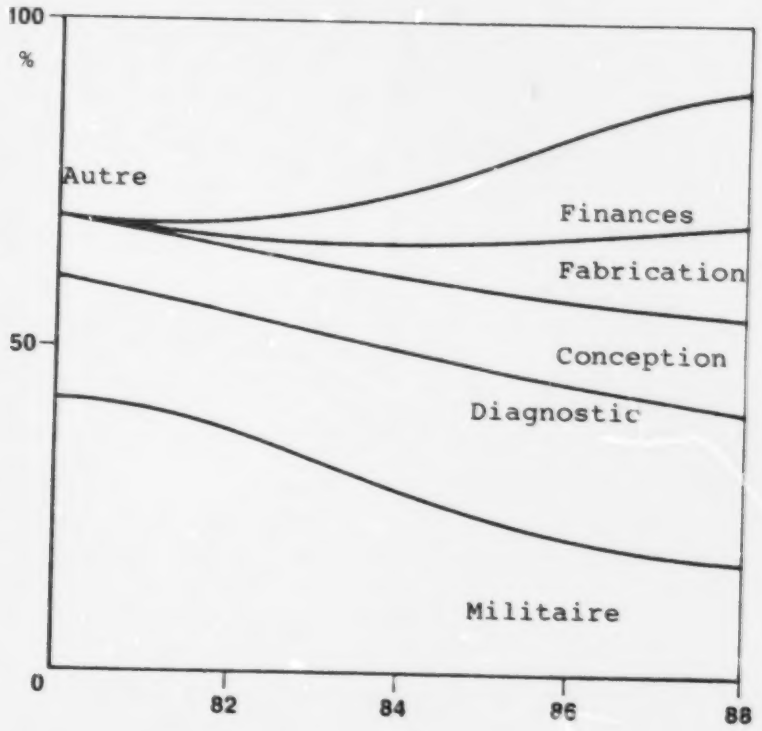


Tableau VI. Tendances dans les utilisations des systèmes experts

(Source : AI Trends '85.)

UTILISATIONS DES SYSTÈMES EXPERTS

1. Conditions de base

Tout d'abord, un expert est indispensable : il doit pouvoir articuler ses connaissances et exprimer clairement son approche. Sa compétence doit être basée sur ses connaissances, son jugement et son expérience. Évidemment, il est souhaitable que ses connaissances ne fassent pas l'objet d'une controverse entre spécialistes.

2. Situations types où utiliser les systèmes experts

Les systèmes experts peuvent être utilisés dans toutes les situations où un grand nombre de données doivent être analysées, c'est-à-dire dans tous les cas où il y a un trop grand nombre de possibilités à considérer, comme dans l'exemple de la fabrication sur mesure des ordinateurs chez Digital Equipment.

La technique des systèmes experts devrait aussi être utilisée quand les techniques informatiques traditionnelles ne sont d'aucune utilité. C'est le cas, entre autres, des problèmes dont la solution ne peut être représentée sous forme d'algorithme.

La spécialité visée doit être relativement rare; le système éventuel devra être utilisé aussi fréquemment que possible. Le cas de l'utilisation d'un tel système dans un domaine à forte intensité de capital où les experts sont rares et où les coûts découlant de l'équipement non utilisé sont relativement élevés, serait un exemple idéal. Il va sans dire qu'un retour élevé sur l'investissement est souhaitable.

Voici des exemples concrets de situation où un système expert pourrait avantageusement être utilisé :

- lorsqu'il n'y a pas d'expert sur place et qu'un conseil doit être donné rapidement (p.ex. plate-forme de forage);
- lorsque la situation évolue trop rapidement et devient trop stressante pour un être humain (p.ex. situation d'urgence dans les centrales nucléaires);
- lorsque la tâche exige une vigilance constante;

- lorsqu'il serait avantageux de fusionner l'expertise de plusieurs spécialistes;

- lorsque certains spécialistes quittent l'entreprise et qu'on ne peut leur trouver de remplaçants;

- lorsqu'on voudrait donner à des experts un assistant électronique leur permettant d'augmenter leur productivité, de mieux gérer l'information et de vérifier les contradictions entre diverses hypothèses;

- lorsque le nombre d'experts est limité et qu'on désire en former de nouveaux.

Dans quelques années, quand on aura appris à mettre à jour rapidement et facilement les connaissances des systèmes experts, on pourra aussi les utiliser dans les situations où la technologie change rapidement.

3. Sortes de problèmes susceptibles d'être résolus

Dans la mise au point d'un système expert, le succès ou l'échec dépendent grandement du choix de l'application, c'est-à-dire du problème que le système tentera de solutionner. Monsieur Hayes-Roth, de la compagnie Teknowledge, recommande de choisir un problème sur lequel un expert humain devrait se pencher entre trois heures et trois semaines avant d'aboutir à une solution. Cette recommandation écarte ainsi les problèmes trop simples ou trop complexes.

Le problème devrait être clairement défini et délimité avec précision. Il peut requérir beaucoup de connaissances, mais pas une connaissance approfondie du monde qui nous entoure. Ces connaissances devront autant que possible être établies sous forme de règles et on devrait pouvoir les résumer en quelques centaines de mots.

Afin de limiter le nombre de règles qui seront nécessaires, le problème choisi ne devrait pas demander une analyse trop poussée. La méthode de résolution du problème fera appel au raisonnement symbolique plutôt qu'au gros bon sens qu'on n'a malheureusement pas encore réussi à simuler sur ordinateur. La tâche doit donc être cognitive ce qui exclut, par exemple, le choix d'un portefeuille d'actions ou encore l'enseignement du tennis.

La méthode de résolution doit être structurée, comme le serait la programmation des opérations de fabrication d'une usine ou encore l'élaboration d'une police d'assurance.

Il va sans dire que des données concernant le sujet doivent également être disponibles. De plus, l'existence de cas types est essentielle si on désire vérifier le fonctionnement du système.

Alors qu'il y a quelques années seulement, beaucoup d'experts entrevoyaient des utilisations grandioses de ces systèmes, il semble que les tendances actuelles restreignent ces derniers à des utilsations beaucoup plus modestes et réalistes, c'est-à-dire à des tâches modestes, définies avec précision, clairement délimitées et qui ne sont pas critiques pour l'organisation.

Cependant, le succès déjà remporté par ces systèmes experts à intelligence limitée dans des domaines particuliers révèle l'à-propos de l'application des technologies de l'intelligence artificielle à l'industrie.

4. Application des systèmes aux machines

Jusqu'ici, nous avons vu que les systèmes experts sont surtout utilisés en tant que conseillers ou assistants électroniques d'experts humains.

Il est donc temps que nous ajoutions, comme le conçoit A. Letendre (1983), que les systèmes experts correspondent aussi à une nouvelle approche de l'intelligence artificielle dans laquelle on émet l'hypothèse qu'un comportement intelligent est basé sur une grande somme de connaissances. Ainsi, les systèmes experts peuvent aussi faire intégralement partie de divers systèmes dit intelligents.

Par exemple, il serait maintenant possible d'utiliser de nombreux instruments capables de fonctionnement autonome et surtout capables d'interpréter leurs propres résultats. Jusqu'à aujourd'hui, un seul instrument du genre a été mis au point : un électro-cardiographe. Un système actuellement à l'étape de la mise au point et permettant d'interpréter des images de télédétection est un autre exemple.

Le ministère des Transports du Japon entreprend cette année la mise au point d'un navire intelligent capable de s'auto-piloter dans les ports. Le système détiendra les connaissances d'un pilote professionnel et pourra aussi diagnostiquer un vaste ensemble de problèmes liés au fonctionnement du navire.

Le système HASP/SIAP est un système de surveillance passive à sonar qui interprète des sons dans un milieu bruyant.

Le système SYNTHEX (Système expert en synthèse) créé par les chercheurs du Centre national d'études des télécommunications (CNET) en France est un exemple particulièrement intéressant. Ce système traduit en paroles des textes écrits. Au lieu de la voix nasillarde et monocorde que les amateurs de science-fiction connaissent, SYNTHEX peut produire des styles oratoires allant de la lecture verbale normale à l'intonation typique d'un commissaire-priseur ou d'un vendeur d'encyclopédies.

A plus long terme, nous verrons apparaître des super-robots, des armes intelligentes, des machines à écrire auxquelles on peut dicter un texte et même des usines autonomes.

5. Utilisation des systèmes par fonction

Les systèmes experts sont difficiles à classifier par fonction puisqu'ils accomplissent souvent plus d'une tâche ou fonction précise.

A partir des textes de Gevarter, de Miller et de quelques autres auteurs, on donne une liste incomplète des systèmes experts les plus connus en les classant par domaine pour chaque fonction principale (Tableau VII). Dans l'ouvrage intitulé The 1984 Inventory of Expert Systems, on trouvera une description détaillée d'un grand nombre de systèmes.

Le tableau VII indique clairement que les systèmes experts peuvent diagnostiquer, analyser et interpréter des données, mener à bien des tâches d'analyse, de conception et de planification, formuler des concepts, interpréter des signaux, surveiller, conseiller l'utilisateur d'un instrument, améliorer les rendements des systèmes d'enseignement assisté par ordinateur, automatiser l'acquisition d'informations, faciliter l'élaboration de systèmes experts (nous reviendrons plus loin sur ce point), jouer le rôle d'assistant ou de conseiller intelligent, faire de la gestion, programmer et, dans une moindre mesure, apprendre par expérience et interpréter des images.

Les systèmes experts peuvent aussi remplir des fonctions de contrôle, d'explication, de répartition des tâches, de vérification, de traitement, de signalisation, de planification de mission et bien d'autres. Ces fonctions ne sont cependant pas indiquées au tableau VII.

A titre d'information, il existe une autre classification des systèmes experts par fonction, celle, plus simple, de Hayes-Roth, Waterman et Lenat présentée au tableau VIII.

	DOMAINE	SYSTÈME	INSTITUTION
Diagnostic	Médecine	PIP	M.I.T.
	Médecine	CASNET	U. Rutgers
	Médecine	Internist/Caduceux	U. de Pittsburg
	Médecine	MYCIN	U. Stanford
	Médecine	PUFF	U. Stanford
	Défaillance dans les ordinateurs	DART	U. Stanford/IBM
	Médecine	MDX	Ohio State University
	Défaillance dans les ordinateurs	IDT	DEC
	Accidents de réacteurs nucléaires	REACTOR	E G & G Idaho
Analyse et interprétation de données	Géologie	DIPMETER ADVISOR	M.I.T./Schlumberger
	Chimie	DENDRAL	U. Stanford
	Chimie	GAL	U. Stanford
	Géologie	PROSPECTOR	SRI
	Crystallographie des protéines	CRYSALIS	U. Stanford
	Détermination des relations causales en médecine	RX	U. Stanford
	Détermination des relations causales en médecine	ABEL	M.I.T.
	Données sur les puits de pétrole	ELAS	AMOCO
Analyse	Circuits électriques	EL	M.I.T.
	Mathématiques	MACSYMA	M.I.T.
	Problèmes de mécanique	MECHO	Edinburgh
	Analyse des menaces sur une force navale	TECH	Rand/NOSC
	Évaluation des dommages causés sur les structures par un tremblement de terre	SPERIL	U. Purdue
	Circuits numériques	CRITTER	U. Rutgers
Conception	Conception d'ordinateurs	XCON	C.M.U.
	Programmation automatique	PECOS	Yale
	Synthèse des circuits	SYN	M.I.T.
	Synthèse chimique	SYNCHEM	State University of N.Y.

	DOMAINE	SYSTÈME	INSTITUTION
Planification	Synthèse chimique	SECHS	U. of California Santa Cruz
	Robotique	NOAH	SRI
	Robotique	ABSTRIPS	SRI
	Vols interplanétaires	DEVISER	JPL
	Planification de déplacements	OP-PLANNER	RAND
	Génétique moléculaire	MOLGEN	U. Stanford
	Planification de missions	KNOBS	MITRE
	Distribution des tâches	ISIS-II	CMU
	Conception d'expériences en génétique moléculiare	SPEX	U. Stanford
	Diagnostics médicaux	HODGKINS	M.I.T.
	Opérations d'un porte-avions	AIRPLAN	CMU
	Cibles tactiques	TATR	RAND
Apprentissage par expérience	Chimie	METADENDRAL	U. Stanford
	Heuristique	EURISKO	U. Stanford
Formation de concepts	Mathématiques	AM	CMU
Interprétation de signaux	Compréhension de la parole	HEARSAY II	CMU
	Compréhension de la parole	HARPY	CMU
	Acoustique automatisée	SU/X	U. Stanford
	Surveillance océanique	HASP	System Controls Inc.
	Capteurs pour navires	STAMMER-2	NOSC San Diego/SDC
	Évaluation de l'état du ventricule gauche	ALVEN	U. de Toronto
	Évaluation de la situation militaire	ANALYST	MITRE
Surveillance	Respiration du patient	VM	U. Stanford
Conseil à l'utilisateur	Analyse structurelle Programmes d'ordinateurs	SACON	U. Stanford

	DOMAINE	SYSTÈME	INSTITUTION
Enseignement assisté par ordinateur	Électronique	SOPHIE	Bolt Beranek and Newman
	Diagnostics médicaux	GUIDON	U. Stanford
	Mathématiques	EXCHECK	U. Stanford
	Gestion d'une usine de génération d'électricité	STEAMER	Bolt Beranek and Newman
	Diagnostic	BUGGY	Bolt Beranek and Newman
	Causes de pluie	WHY	Bolt Beranek and Newman
	Enseignement d'un jeu	WEST	Bolt Beranek and Newman
	Enseignement d'un jeu	WUMPUS	M.I.T.
		SCHOLAR	Bolt Beranek and Newman
Acquisition de connaissances	Diagnostic médical	TEIRESIAS	U. Stanford
	Consultation médicale	EXPERT	Rutgers
	Géologie	KAS	SRI
Élaboration d'un système expert		ROSIE	Rand
		AGE	U. Stanford
		HEARSAY III	USC/ICI
		EMYCIN	U. Stanford
		OPS 5	CMU
	Diagnostic médical	RAINBOW	IBM
	Consultation médicale	KMS	U. of MO
	Diagnostic d'un système électronique	EXPERT	Rutgers
	Consultation médicale à l'aide de données temporelles	ARBY	Yale/ITT
		MECS-AI	Tokyo
Consultation (assistant intelligent)	Distribution d'armes	BATTLE	U.S. Navy Centre for applied research in art. intelligence
	Médecine	Digital Therapy Advisor	M.I.T.
	Radiologie	RAYDEX	U. Rutgers
	Ventes d'ordinateurs	XCEL	CMU
	Traitement médicaux	ONCONCIN	U. Stanford
	Station nucléaire	CSA Model-Based Nuclear Power Plan Consultant	GA Tech
Gestion	Usine automatisée	IMS	CMU
	Gestion de projet	CALLISTO	DEC
	Données pétrolières sous forme de modèles	PHOENIX	Schlumberger-Doll Res.

	DOMAINE	SYSTÈME	INSTITUTION
Programmation automatique		CHI	Kestrel Inst.
		PECOS	U. Stanford
		LIBRA	U. Stanford
		SAFE	VSC/ISI
		DEDALUS	SRI
		Programmer's Apprentice	M.I.T.
Compréhension des images		VISIONS	U. of Mass/Amherst
		ACRONYM	U. Stanford

Tableau VII. Systèmes experts existant classés par fonction

(Source : Miller, The 1984 Inventory of Expert Systems.)

Catégorie	Problèmes types
Interprétation	Déduire et décrire certaines situations à partir de données obtenues de capteurs
Prédiction	Déduire les conséquences probables de situations données
Diagnostic	Déduire les mauvais fonctionnements d'un système à partir de données observables
Conception	Concevoir des objets en tenant compte de contraintes
Planification	Élaborer une suite d'actions
Surveillance	Comparer des observations pour identifier les points vulnérables
Réparation	Suggérer des solutions pour remédier à des défaillances et élaborer un plan pour mettre à exécution
Enseignement	Diagnostiquer et isoler les erreurs d'un étudiant, remédier à son comportement
Contrôle	Interpréter, prédire, réparer et surveiller les comportements du système

Tableau VIII. Catégories de systèmes experts.

(Source: Hayes-Roth, F., Waterman, D.A. et Lenat, D.B., Building Expert Systems, Addison-Wesley, Reading, MA [1983]).

6. Utilisation par champ d'activité

Les systèmes experts peuvent être utilisés dans presque tous les champs de l'activité humaine. Les exemples suivants sont des domaines où les systèmes experts sont actuellement utilisés :

- en prospection minérale et pétrolière ainsi qu'à d'autres fins géologiques;
- dans le domaine pétrolier pour la gestion des puits de pétrole et des plates-formes de forage ainsi que des problèmes qui sont associés à ce domaine;
- en médecine pour les diagnostics médicaux et pour améliorer le traitement de diverses maladies;
- en génie pour le diagnostic des défaillances d'équipement et l'entretien (sont comprises les utilisations portant sur les turbines à vapeur, les moteurs d'avion et de locomotive diesel, les ordinateurs et les réseaux de télécommunication);
- dans l'industrie manufacturière pour la planification de la production, la répartition des tâches, l'expédition ainsi que le diagnostic des problèmes liés à la production;
- dans la conception de circuits intégrés, l'analyse structurelle et l'identification de problèmes mécaniques;
- dans les services financiers comme les banques et l'assurance (sont comprises la prévision des taux de change, la consultation pour les finances et les investissements personnels, et la préparation de polices d'assurance);
- en chimie et en biotechnologie pour la planification d'expériences et l'interprétation de leurs résultats;
- en mathématiques pour la résolution d'équations complexes et la dérivation de nouveaux algorithmes;
- dans la vente pour aider le personnel de vente à mettre au point le produit afin que ce dernier corresponde le plus possible aux besoins du client;
- en gestion pour faciliter l'utilisation des banques de données;

- en agriculture pour prévoir les rendements théoriques de diverses cultures dans des conditions variables et pour diagnostiquer différentes maladies et recommander des traitements appropriés;

- dans les édifices pour assurer une surveillance automatique et pour faire en sorte que l'utilisation de l'énergie se fasse de façon optimale;

- dans le contrôle des réacteurs nucléaires;

- dans le contrôle aérien;

- en droit et en comptabilité pour automatiser l'interprétation des règles fiscales, la vérification et la préparation de testaments;

- en programmation pour améliorer la productivité des programmeurs en automatisant les fonctions routinières;

- en enseignement assisté par ordinateur pour améliorer les capacités des systèmes actuels; par exemple, en amenant l'étudiant à émettre des hypothèses ou encore, en lui expliquant ses défaillances et en s'adaptant à son propre rythme d'apprentissage; et,

- dans les secteur militaires comme la classification des cibles, la surveillance automatique ou la gestion d'un porte-avions.

Le tableau IX représente un regroupement sommaire de quelques systèmes experts utilisés dans différents domaines. Chaque exemple est accompagné d'une brève description du système.

7. Systèmes utilisés de façon courante

Bien que des centaines de systèmes experts soient en voie de réalisation, un bref survol de la documentation les concernant indique que bien peu d'entre eux sont utilisés de façon courante dans les opérations des diverses firmes impliquées. La plupart en sont encore au stade expérimental. Toutefois, étant donné l'intensité hors du commun générée par les activités reliées à ce domaine, le caractère relativement nouveau de cette technologie et l'intérêt dont ont fait preuve des firmes importantes comme Xerox, IBM, Schlumberger, Elf-Aquitaine, General Electric et bien d'autres, il est quasiment certain que cette situation changera radicalement d'ici deux à trois ans tout au plus.

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Agriculture	Counsellor	Un système de diagnostic des maladies qui suggère des traitements en utilisant les produits de ICI et qui donne en outre une analyse économique des rendements éventuels.	ICI (Royaume-Uni)
Biotechnologie	Molgen	Planification des expériences en génétique moléculaire.	U. de Stanford
	Microprocessor Expert	Interprétation des résultats d'électrophorèse sur des protéines.	
Communications	ACE (Automated Cable Expertise)	Utilise les données d'une banque de données et surveille les réseaux de télécommunication pour déterminer les besoins au niveau de la réparation et de l'entretien.	Bell Laboratories
Chimie	Chrysalis	Interprète les diagrammes de diffraction des molécules de protéine.	U. de Stanford
	Dendral	Génère des structures chimiques plausibles représentant des molécules organiques à partir de données obtenues par spectroscopie de masse.	U. de Stanford
	Genoa	Descendant de Dendral qui interprète des structures chimiques.	Molecular Design (Californie)
	Meta-Dendral	Découvre de nouvelles règles sur le comportement des fragments en spectroscopie de masse.	U. de Stanford
	SECS	Planification de synthèse en chimie organique.	U. de Princeton
Droit	LDS	Système expérimental qui simule le processus de décision des avocats et des experts d'assurance dans des causes sur la responsabilité liée au produit.	Rand Corp.

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Droit (suite)	Taxman	Un système expérimental qui traite des règles des lois fiscales et qui recommande une suite d'accords contractuels qu'une compagnie peut établir pour atteindre ses objectifs financiers.	U. Rutgers
Énergie	_____	Diagnostic et suggère certaines corrections en vue du bon fonctionnement d'une usine de génération d'électricité.	Batelle
Fabrication	Callisto	Surveille, élabore le plan d'exécution et en fait un modèle; gère de grosses réalisations.	U. Carnegie-Mellon
	IMACS	Aide à mieux gérer les mouvements de travail à l'intérieur d'une usine, en coopération avec les systèmes traditionnels.	Digital Equipment
		Coordonne l'expédition des produits aux consommateurs.	Digital Equipment
	ISIS	Élabore des plans d'exécution de tâches.	U. Carnegie-Mellon
		Diagnostique les problèmes manufacturiers sur une chaîne de production de circuits intégrés.	Hitachi
Finance et comptabilité	_____	Prévoit les taux de change.	Security Pacific National Bank (Los Angeles)
	_____	Conseille sur les questions de finances personnelles.	Rand Corp. (pour une grosse banque américaine)
Assurances	_____	Conseille les agents d'assurance et les aide à élaborer de meilleures polices d'assurance pour leur client.	Cognitive Systems (New Heaven)

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Formation	_____	Enseigne le fonctionnement d'un générateur à vapeur.	Bolt Beranek and Newman
	Mois (Maintenance and Diagnostics Information System)	Un système d'acquisition de la connaissance dans de multiples domaines qui aide les recrues à diagnostiquer et réparer les défaillances dans divers systèmes.	Boeing Aerospace
	Ada Tutor	Système d'enseignement assisté par ordinateur.	Computer Thought (Texas)
	Guindon	Un système intelligent d'enseignement assisté par ordinateur qui questionne et corrige ensuite les réponses concernant des sujets techniques.	U. de Stanford
	Prospector	Presse une carte des gisements qu'il découvre. Est utilisé pour déterminer les forages exploratoires.	SRI International pour le US Geological Survey
Génie	EL	Analyse les circuits électroniques.	MIT
	Mecho	Analyse les problèmes mécaniques.	U. d'Edinbourg
	SACON (Structural Analysis Consultant)	Conseille l'utilisateur du logiciel très complexe Marc en ce qui a trait à l'analyse structurelle. (Marc demande normalement une année d'apprentissage avant d'être utilisé.)	U. de Stanford
	_____	Aide à concevoir la disposition des divers tuyaux dans des usines de transformation chimiques.	ICI Products (Royaume-Uni)
Gestion	KM-1	Système de gestion qui tente d'intégrer les capacités d'un système de gestion des banques de données et celles d'un système expert.	System Development Corp.

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Gestion (suite)	RABBIT	Un système qui aide l'utilisateur à questionner une banque de données	Xerox Palo Alto Research
	Série " Human Edge " : Sales Edge, Management Edge, Negotiation Edge et Communications Edge	Systèmes coûtant 200-300 $ US pour Apple, basés sur divers traits de personnalité de l'utilisateur et d'une tierce personne ou sur des renseignements les concernant.	
Industrie pétrolière	Dipmeter advisor	Analyse des données recueillies par des capteurs.	Schlumberger
	Drilling Advisor	Conseille le contre-maître d'un puits de forage sur les façons de résoudre les problèmes résultants d'une tête foreuse figée.	Teknowledge (pour Elf Acquitaine)
	SPILLS	Un système de gestion des crises pour aider à situer et à identifier des déversements chimiques accidentels.	Rand Corp.
	_____	Diagnostique le malfonctionnement d'un réacteur à acide nitrique.	Batelle
Industrie des transports	CATS-1	Système expert pour le diagnostic et l'entretien des moteurs Diesel électriques.	General Electrics
Industrie informatique	DART	Isole et recommande des réparations sur les ordinateurs IBM.	U. de Stanford et IBM
	DOC	Assiste le personnel de service dans l'identification des défaillances communes des systèmes informatiques.	Prime Computer
	PSI	Compose des programmes d'ordinateur simples basés sur des descriptions (en anglais) des tâches à accomplir.	Kestrel Institute et Systems Control Corp.

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
	XSEL	S'assure que les commandes d'ordinateurs sont justes avant d'entreprendre l'élaboration et l'assemblage.	Digital Equipment
	XSITE	Aider à préparer le site pour l'installation d'ordinateurs en déterminant les dimensions voulues de la pièce, les besoins en électricité et en climatisation, par exemple.	Digital Equipment
	XCON	Aide à élaborer les différents modèles d'ordinateurs de la compagnie DEC.	Digital Equipment et U. de Carnegie-Mellon
Mathématiques	AM	Découvre des concepts mathématiques.	U. de Stanford
	LEX 2	Compose des heuristiques pour résoudre des problèmes en calcul intégral à partir de son expérience à calculer des intégrales.	U. de Rutgers
	MACSYMA	Décide quel algorithme utiliser pour résoudre des équations algébriques.	Symbolics (Cambridge, Mass).
	SMP (Symbolic Manipulation Program)	Système commercial pour résoudre des équations mathématiques.	Inference (California).
Médecine	CASNET	Diagnostique les maladies de l'oeil.	U. de Rutgers
	Clini-Scan	Interprète les résultats de tests sanguins.	_____
	Digitalis	Aide à prescrire un traitement de digitaline aux patients souffrant de troubles cardiaques.	M.I.T.
	Headmed	Prescrit des médicaments anti-psychotiques aux patients atteints de maladies mentales.	_____

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Médecine (suite)	Internist/Caduceus	Diagnostique jusqu'à 500 maladies différentes en médecine interne.	Pittsburg U.
	Mycin	Diagnostique les infections bactériologiques du sang et la méningite, et recommande un traitement aux antibiotiques.	U. de Stanford
	Oncocin	Surveille la réaction des patients atteints de cancer aux traitements par médicaments et prescrit la chimio-thérapie la plus efficace et occasionnant le moins de réactions toxiques.	U. de Stanford
	PIP	Diagnostique les maladies rénales.	MIT et Tufts Medical Centre
	PUFF	Diagnostique les troubles et les infections pulmonaires.	Pacific Medical Center et U. de Stanford
	RX	Aide l'analyse statistique des malades chroniques sur lesquels on a des données s'échelonnant sur plusieurs années.	U. de Stanford
	VM (Ventilator Management)	Donne des recommandations pour le bon fonctionnement d'un appareil de mesure de la capacité respiratoire.	Pacific Medical Center
Microélectronique	KBVLSI	Un système expérimental de création de circuits intégrés basé sur la méthode de Meed-Conway.	U. de Stanford/Xerox
	Palladio	Vérifie les modèles de circuits intégrés et suggère des changements.	Fairchild/U. de Stanford
Militaire	Acronym	Un ensemble de systèmes experts interreliés et spécialisés dans l'interprétation des images.	_____

DOMAINE	NOM DU SYSTÈME	DESCRIPTION	INSTITUTION
Militaire (suite)	Analyst	Système expert capable de fusionner de l'information provenant de divers capteurs.	Mitre Corp.
	HASP/SIAP	Un système passif de surveillance qui interprète les signaux dans un environnement bruyant. Déduit la position et le type de vaisseau naviquant sur le Pacifique à partir de données transmises par un réseau submergé de capteurs acoustiques.	System Control
	SU/X	Identifie des avions d'après leurs caractéristiques de vol et les suit d'après des données obtenues de capteurs en émettant des hypothèses sur leur position et leur vitesse, et en extrapolant.	Stanford U.
	_____	Système de guidage et de navigation pour un robot.	Batelle
	_____	Classifie les cibles pour la U.S. Navy à partir d'images obtenues par un " side looking " radar.	Hughes Aircraft (Advanced Information and Decision Systems Division)
Ressources	Hydro	Système de consultation pour résoudre des problèmes liés aux ressources hydrologiques.	SRI International

Tableau IX. Utilisation des systèmes experts par grands domaines.

Voici cependant quelques exemples de systèmes utilisés de façon routinière, ceux-ci ne comprenant pas les nombreux squelettes de systèmes experts maintenant mis sur le marché un peu partout : MACSYMA, MOLGEN, PUFF, DENDRAL, XCON, SMP, PICON (Process Intelligent CONtrol), ADA TUTOR, MICROPROCESSOR EXPERT, STEAMER et DIPMETER ADVISOR.

8. Diffusion de la technologie

Nous venons de voir que la technologie des systèmes experts en est encore à ses premiers balbutiements. Dans le cycle de vie d'une technologie, nous devrions situer cette technologie au tout début du cycle, c'est-à-dire là où le produit fait son entrée sur le marché.

Il existe encore un écart important entre le produit expérimental et le genre de système expert qui pourra être commercialisé avec succès. Trouver la bonne application des systèmes experts n'est pas un problème facile.

Actuellement, un des principaux obstacles à la diffusion des systèmes experts est l'ensemble des coûts reliés à ceux-ci, du moins en ce qui à trait aux systèmes importants.

En premier lieu, tous ces systèmes sont conçus sur mesure pour un seul client, sauf exception. Ensuite, comme nous le verrons plus loin, la mise au point d'un système nécessite énormément d'efforts. Enfin, ces systèmes sont conçus pour fonctionner dans des milieux sophistiqués : les outils nécessaires à leur réalisation sont coûteux et la plupart des systèmes fonctionnent sur des machines spécialisées. Il faut noter, dans ce domaine, que les prix tombent avec une extrême rapidité à mesure que la concurrence s'intensifie et qu'on crée des circuits intégrés optimisés pour ces ordinateurs. De plus, des outils de conception et de mise au point peu dispendieux ainsi que des systèmes pouvant être utilisés sur ordinateur personnel font maintenant leur apparition sur le marché.

Un important système commercial comme le système PICON (Process Intelligent CONtrol), se vend entre 150 000 $ et 200 000 $ US, ce prix incluant une machine Lisp.

Les langages Lisp (LISte Processing) et Prolog (PROgrammation en LOGique), utilisés pour créer la plupart des systèmes experts, sont peu connus en dehors du domaine de l'intelligence artificielle. De plus, il existe tant de dialectes de ces deux langages particuliers à une machine donnée que les systèmes experts sont difficilement transférables d'une machine à l'autre.

Bien que certains auteurs émettent parfois une opinion contraire, il semble que ces systèmes soient quelquefois difficiles d'utilisation aux personnes n'ayant pas contribué à leur mise au point. Il faut cependant noter que ce problème est commun à tous les logiciels et que les systèmes experts constituent une nette amélioration à ce point de vue. De plus, la recherche dans le domaine du langage naturel résoudra en grande partie ce problème, si problème il y a.

Parmi les autres obstacles à la diffusion, il y a la lenteur d'exécution de certains systèmes, la piètre fiabilité de ces systèmes dans certaines situations, leur manque de polyvalence et les problèmes d'acceptation au niveau des utilisateurs.

Quant à savoir si les éventuels utilisateurs se serviront de ces systèmes, cette question est d'ordre psychologique. S'ils perçoivent que le système peut les aider à résoudre des problèmes ou à trouver de meilleures solutions et que cette méthode corresponde à leurs exigences financières, le système sera probablement accepté. La compagnie qui crée le système devra alors s'assurer à tout prix que les utilisateurs éventuels participent à la conception du système. En fait, il s'agit d'un problème de changement organisationnel, sujet qui a fait l'objet de nombreuses thèses dans les facultés d'administration.

En conclusion, il faut tout de même noter que certains systèmes pratiques commencent à être réalisés par divers groupes d'utilisateurs et ce, à des pris relativement bas. Bien que les revenus obtenus soient modestes en comparaison à ceux résultant de la création de systèmes plus puissants, ils sont quand même intéressants. De plus, l'expérience ainsi acquise permettra aux spécialistes de se lancer dans des entreprises plus ambitieuses.

TECHNOLOGIE

1. Technologie de base

En informatique, on a réalisé très tôt que seulement certains problèmes avaient une solution algorithmique et que les heuristiques indépendantes au problème ne pouvaient pas faire face à la rapide multiplication des combinaisons à considérer. La logique ne peut pas, de plus, traiter des faits incertains et des axiomes flous.

On a vite compris aussi que les experts humains, d'autre part, possédent une somme énorme de connaissances et qu'ils peuvent cerner un problème, suggérer la bonne tactique, évaluer la fiabilité des faits et déterminer si la solution est raisonnable et plausible.

Donc, comme nous l'avons vu précédemment, les systèmes experts sont une grande banque de connaissances (ou de données et de faits) doublée de mécanismes heuristiques.

1.1 Structure des systèmes experts

Le principe de base des systèmes experts consiste à séparer la banque de connaissances (ou de données) de la structure de contrôle. Ce principe est contraire à celui des logiciels conventionnels puisque dans leur cas les données sont intimement reliées au programme lui-même et qu'elles font, en fait, intrégralement partie du programme. C'est la raison pour laquelle les logiciels classiques sont très difficiles à modifier.

Un système expert est donc constitué d'une banque de connaissances qui contient les faits et les heuristiques, d'une " machine à raisonnement par inférence " qui utilisera la banque de connaissances ainsi que d'une mémoire de travail destinée à suivre l'évolution du problème et du système et à garder en mémoire les entrées faites par l'utilisateur. Le tableau X représente schématiquement la structure de base des systèmes experts alors que le tableau XI donne un peu plus de détails. La structure de la prochaine génération de systèmes experts est schématisée au tableau XII, à titre d'information seulement.

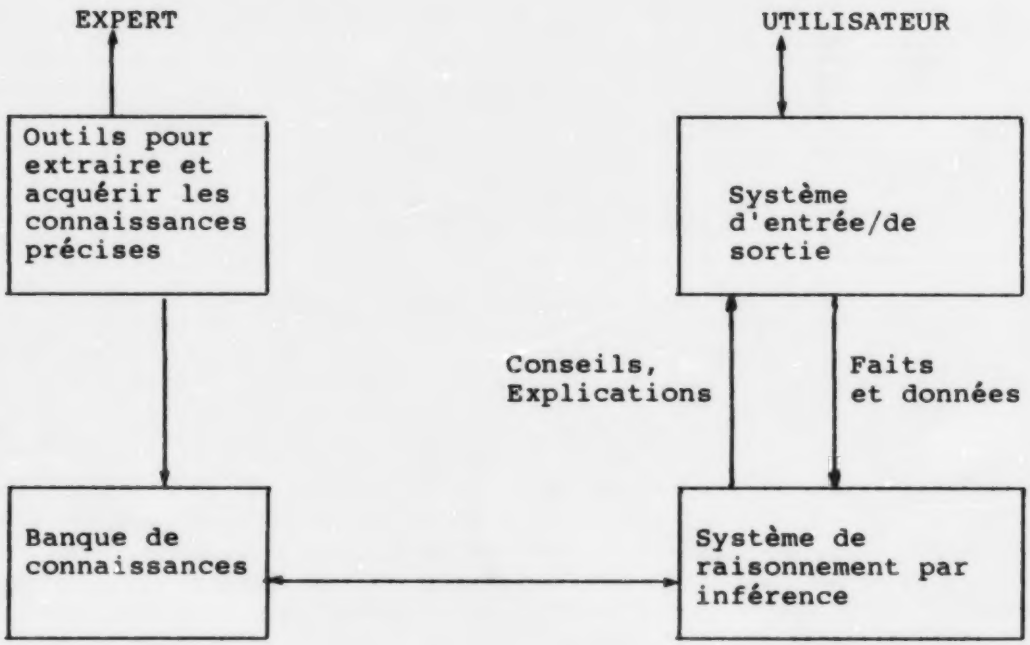


Tableau X. Structure de base d'un système expert.

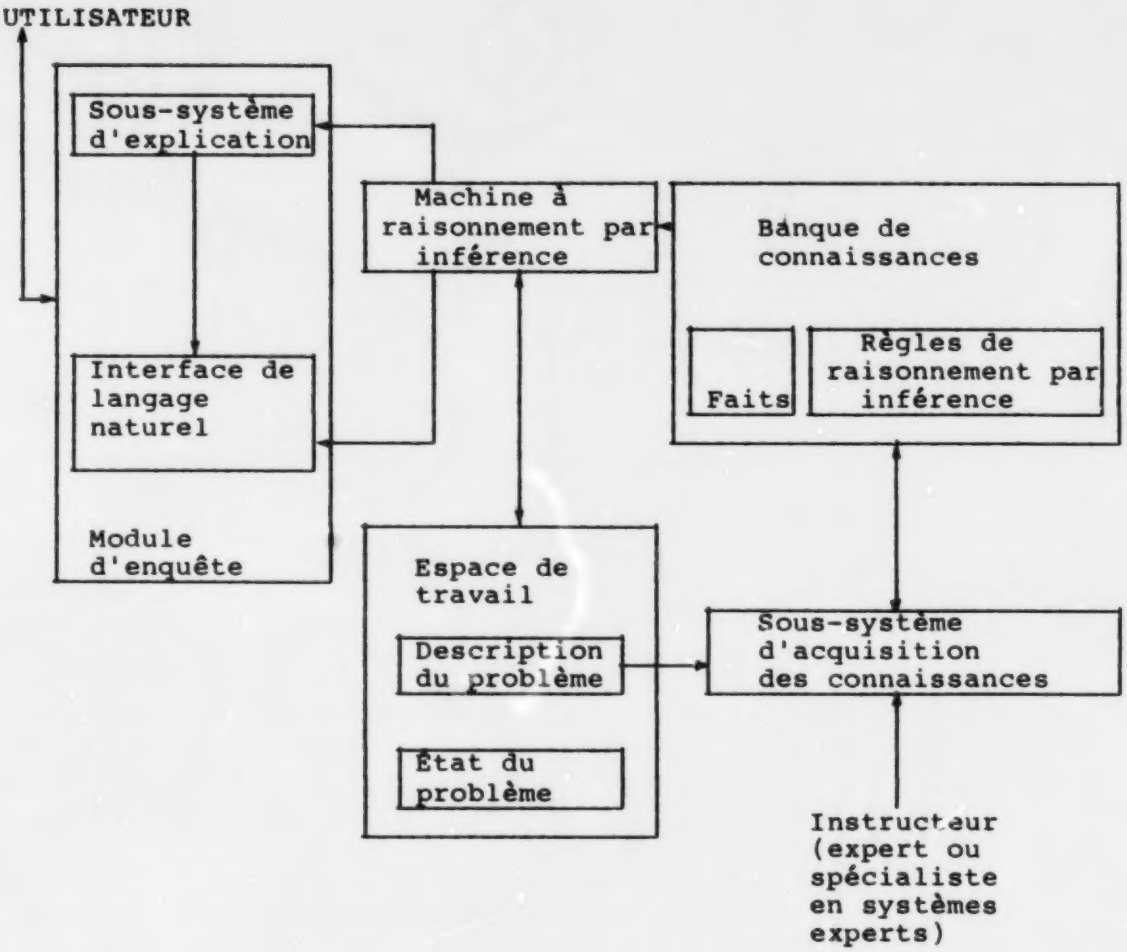


Tableau XI. Structure détaillée d'un système expert.

(Source : P. Kinnucan, Computers That Think Like Experts, High Technology, janvier 1984.)

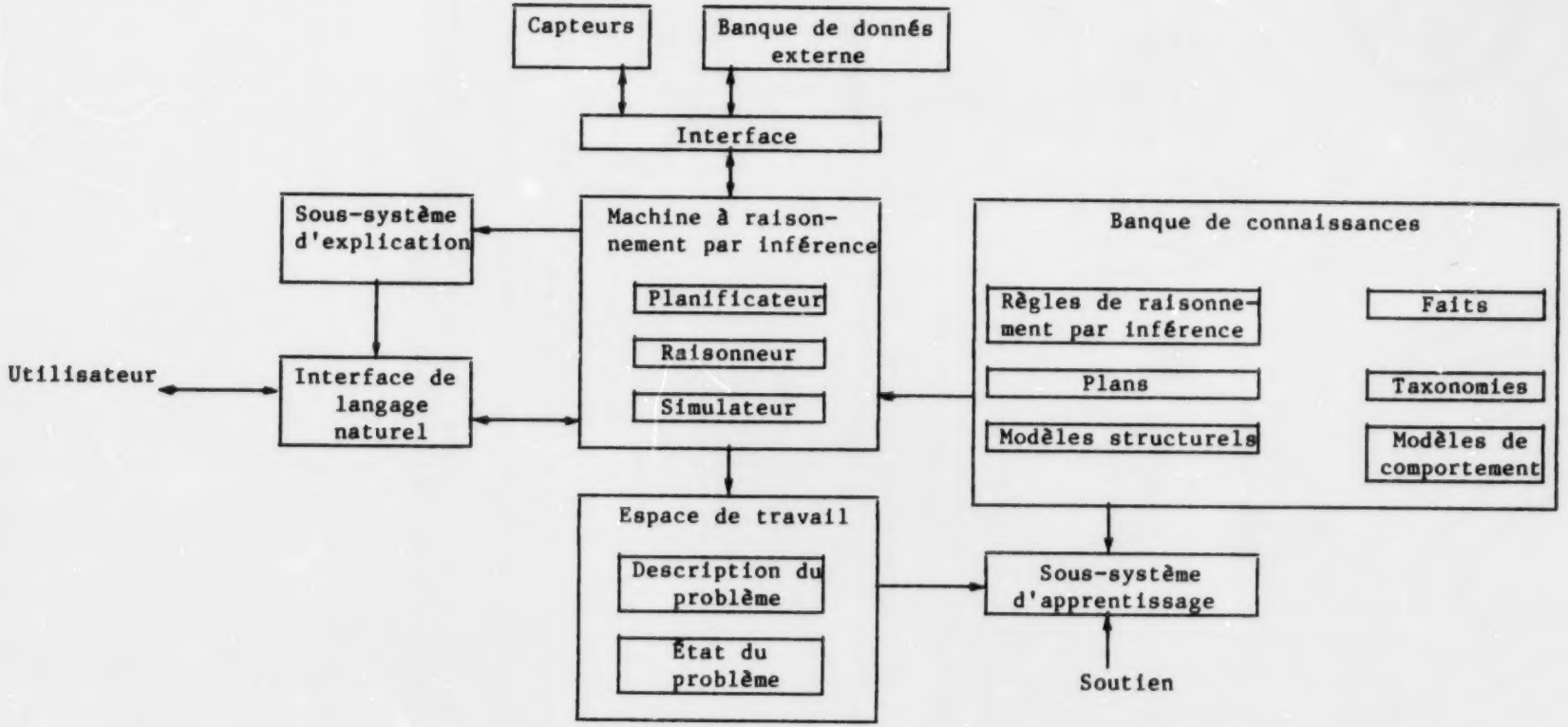


Tableau XII. Système expert du futur.

(Source: P. Kinnucan, Computers That Think Like Experts, High Technology, janvier 1984.)

Afin de mettre au point les systèmes experts, un spécialiste, Randall Davis, a énoncé les principes suivants :

- il faut séparer le système de raisonnement (normalement appelé machine à raisonnement par inférence) de la banque de connaissances pour faciliter la mise à jour ou toute autre modification de celle-ci;

- il faut utiliser une méthode de représentation des connaissances aussi uniforme que possible afin que le système soit le plus simple possible;

- il faut que la machine à raisonnement par inférence reste le plus simple possible afin de faciliter les explications que donnera le système de son " raisonnement " et pour faciliter le processus d'acquisition des connaissances;

- il faut exploiter autant que possible la répétition et les recoupements pour pallier aux connaissances partielles ou inexactes.

1.1.1 Banque de connaissances

La banque de connaissances contient l'ensemble des informations qui sont du domaine public et qu'on peut trouver, dans des dictionnaires, manuels, magazines, etc. Ce sont des termes et des faits, y compris les façons de classifier et d'emmagasiner les connaissances du domaine en question ainsi que les procédures standardisées. On y trouve aussi les connaissances heuristiques (règles personnelles utilisées par les experts). Un exemple typique de celles-ci serait de rechercher l'information importante dans les premiers paragraphes d'un article de journal. Un autre serait de chercher les extrêmes quand on tente de découvrir de nouveaux concepts. La banque de connaissances peut aussi inclure de l'information sur la structuration logique des connaissances propres à un domaine particulier.

Il faut cependant noter que les heuristiques sont difficiles à produire et à définir, car un expert en la matière n'est souvent pas conscient de sa façon de procéder.

Nous allons maintenant utiliser quelques exemples concrets afin de voir en quoi consiste le contenu des banques de connaissances de quelques systèmes.

- La banque de connaissances du système DENDRAL, qui génère des structures plausibles de molécules organiques à partir de données de spectrographie de masse, contient l'information suivante : des règles pour dériver des contraintes liées à la structure moléculaire à partir de données expérimentales, une méthode permettant de générer des structures répondant aux contraintes et des règles prédisant les spectres de masse des structures générées.

- Le système XCON de Digital Equipement, un système destiné à concevoir les ordinateurs de cette firme, connaît les centaines de composantes entrant dans la fabrication de l'ordinateur, les règles déterminant le moment propice à l'amorce de l'étape suivante ainsi que celles permettant de mener à bien chacune des sous-étapes. Le système comprend actuellement quelque 1200 règles et de nouvelles règles s'ajoutent régulièrement à ce nombre.

- MYCIN, le doyen des systèmes, dépiste les infections bactériologiques et recommande un traitement aux antibiotiques. Sa banque de connaissances contient des règles permettant d'établir un lien entre les données du patient et les hypothèses d'infection, de même que des règles concernant la combinaison des facteurs de certitude et des règles de traitement.

- Enfin, le système AM, système qui conçoit des concepts mathématiques, contient des concepts élémentaires de la théorie des ensembles finis, des heuristiques permettant de générer de nouveaux concepts grâce à la combinaison des concepts élémentaires, ainsi que des règles heuristiques permettant d'attribuer aux concepts générés par le système un degré d'intérêt.

Le tableau XIII donne en détail certains des exemples qui viennent d'être cités.

Comme nous l'avons vu, les systèmes experts sont basés sur des règles. Cependant, il existe des exceptions et nous verrons plus loin que la machine à raisonnement par inférence contient un interprète de règles qui décide quelle règle appliquer et qui la met en marche.

Les systèmes basés sur des règles sont de loin les plus nombreux. Ces règles prennent normalement la forme d'une proposition de type " situation-action " (si...alors). C'est ce qu'on appelle des " règles de production " . En les combinant, on obtient une chaîne de raisonnement qui ressemblera à ceci : comme :
si...et...et...ou...alors...si...alors...

SYSTÈME	APPROCHE	BASE DE CONNAISSANCES	BASE DE DONNÉES GLOBALE
DENDRAL (génère des structures plausibles de molécules organiques à partir de spectres de masse)	1. Dérive des contraintes à partir des données 2. Compose des structures possibles 3. Prédit des spectres de masse 4. Compare ceux-ci aux données	1. Règles pour dériver des contraintes sur les structures moléculaires à partir de données expérimentales 2. Procédure pour générer des structures satisfaisant les contraintes 3. Règles pour prédire les spectres à partir des données	1. Données de spectrogrammes de masse 2. Contraintes 3. Structures possibles
AM (Conçoit des concepts mathématiques)	1. Part de concepts élémentaires de la théorie des ensembles 2. Cherche des conjectures qui peuvent être générées à partir de ces concepts 3. Choisit la plus intéressante de celles-ci et poursuit sur cette voie	1. Concepts élémentaires de la théorie des ensembles 2. Heuristiques permettant de générer de nouveaux concepts en combinant les concepts élémentaires 3. Heuristiques permettant de déterminer le niveau d'intérêt des concepts générés	1. Concepts plausibles
XCON (Conceptualise des ordinateurs à partir des bons de commande)	1. Fragmente le problème en sous-problèmes 2. Résoud chaque sous-problème et passe au suivant	1. Propriété des composantes 2. Règles déterminant le moment propice du début de l'étape suivante 3. Règles pour mener à bien chacune des sous-étapes	1. Bons de commande 2. Tâche courante 3. Etat du système

SYSTÈME	APPROCHE	BASE DE CONNAISSANCES	BASE DE DONNÉES GLOBALE
MYCIN (Diagnostique les infections bactériologiques et recommende un traitement aux antibiotiques)	1. Représente le raisonnement sous forme de règles condition-conclusion ainsi que des degrés de certitude 2. Part d'une hypothèse de diagnostic et vérifie si les éléments l'appuient 3. Évalue toutes les hypothèses 4. Donne un traitement pour toute maladie diagnostiquée avec certitude	1. Règles reliant les données aux hypothèses des causes d'infection 1. Règles concernant la combinaison des facteurs de certitude 3. Règles axées sur le traitement	1. Histoire médicale du patient et tests 2. Hypothèse courante 3. Statut du système 4. Conclusions et règles utilisées

Tableau XIII. Exemple de contenu de diverses banques de connaisances

(Source : W.B. Gevarter, An overview of Expert Systems, U.S. Dept. of Commerce, 1982.)

Par exemple, la règle suivante de MYCIN est souvent citée sous sa forme en langage courant (non pas sans la forme de langage formel) :

> " Si (i) l'infection est une méningite, et (ii) que des organismes n'ont pas été détectés lors de la coloration de la culture et (iii) que le type d'infection peut être viral et (iv) que le patient a été sévèrement brûlé, alors il est probable que le Pseudomonas aeruginosa soit un des organismes responsable de l'infection. "
>
> (Duda et Shortliffe, 1983)

Les règles de ce type présentent un attrait considérable puisque le système devient ainsi fortement modulaire. Si on désire ajouter une règle au programme, on n'a pas à réécrire complètement ce dernier; il suffit d'ajouter la dernière règle à la suite des précédentes. Le fait que ce procesus est semblable à celui des experts humains est un grand avantage.

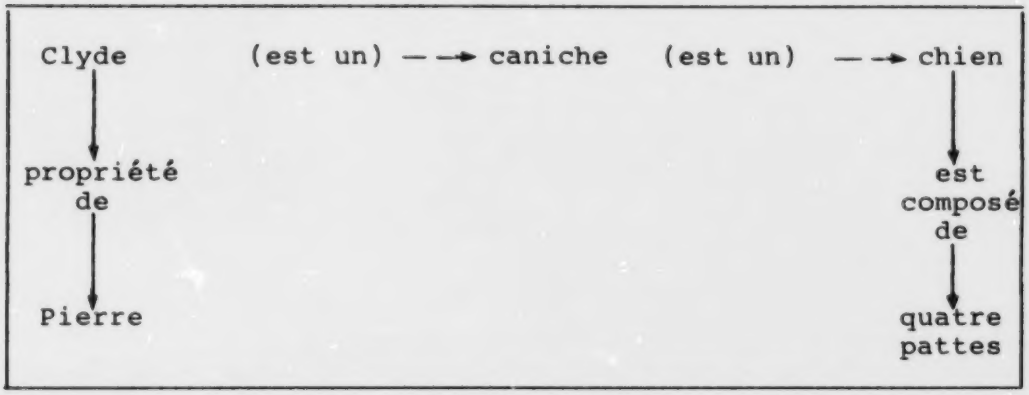
Le tableau XIV est un exemple de réseau de règles permettant de déterminer la nature d'un animal d'après certaines de ses caractéristiques. Ainsi, (i) si l'animal a du poil, (ii) s'il a des sabots, (iii) s'il a de longues pattes et (iv) s'il porte des taches foncées, c'est une girafe.

Les systèmes actuels comprennent environ 1000 règles, quelquefois beaucoup plus ou beaucoup moins. Ainsi, DIPMETER, un système destiné à mesurer l'inclinaison des formations géologiques à partir des relevés de quatre capteurs, ne comprend que 90 règles. MYCIN n'a que 500 règles alors que CATS-1 (pour diagnostiquer les réparations à faire sur des moteurs Diesel) a 1500 règles et XCON en a plus de 3000.

Le fait qu'un système comprend un grand nombre de règles ne veut pas nécessairement dire qu'il a un rendement élevé. Bien qu'il soit normal que le nombre des règles augmente au fur et à mesure du parachèvement du système, il peut parfois s'avérer avantageux de le réduire. Tel est le cas pour DIPMETER, système dont la banque de connaissances a été réduite de 150 à 90 règles et qui a vu son rendement s'améliorer.

Cependant, les systèmes ne sont pas tous basés sur des règles, puisque certains sont basés sur des réseaux de relations de cause à effet (CADUCEUS, PROSPECTOR, HARPY, MACSYMA, DIGITALIS). Au tableau XV, on trouvera un exemple de ce type de réseau. Cette approche peut être utilisée dans le cas de recommandations plus ou moins compliquées.

Il existe également un type de système basé sur des réseaux sémantiques fondés sur des inter-relations comme l'exemple du rapport de Barker (1983) le montre ci-dessous.



Une quatrième manière de représenter la connaissance est le modèle des cadres (à défaut de traduction pour le mot " frame ") qui représentent les objets par des attributs standardisés. Par exemple, les oiseaux ont un habitat, des parties anatomiques, des couleurs, etc. L'exemple ci-dessous est tiré du rapport de Barker (1983) :

CADRE : Personne

Nom : John Jones
Age : si nécessaire (date actuelle moins date de naissance) étendue : (0 - 100) années
Père : si nécessaire (mari de la mère)
Mère : Mary Jones
Date de naissance : 6 janvier 1950
Téléphone : 758-3741
(si changé, mettre à jour)

Dans le dernier type de représentation, on utilise un raisonnement déductif de type syllogistique comme " Tous les hommes sont mortels, Socrate est un homme, donc Socrate est mortel ". En voici un exemple formel systématisé :

IN (John, Paris)
IN (x, Paris) = not FAR (x, Louvre)
---
not FAR (John, Louvre)

(Barker, 1983)

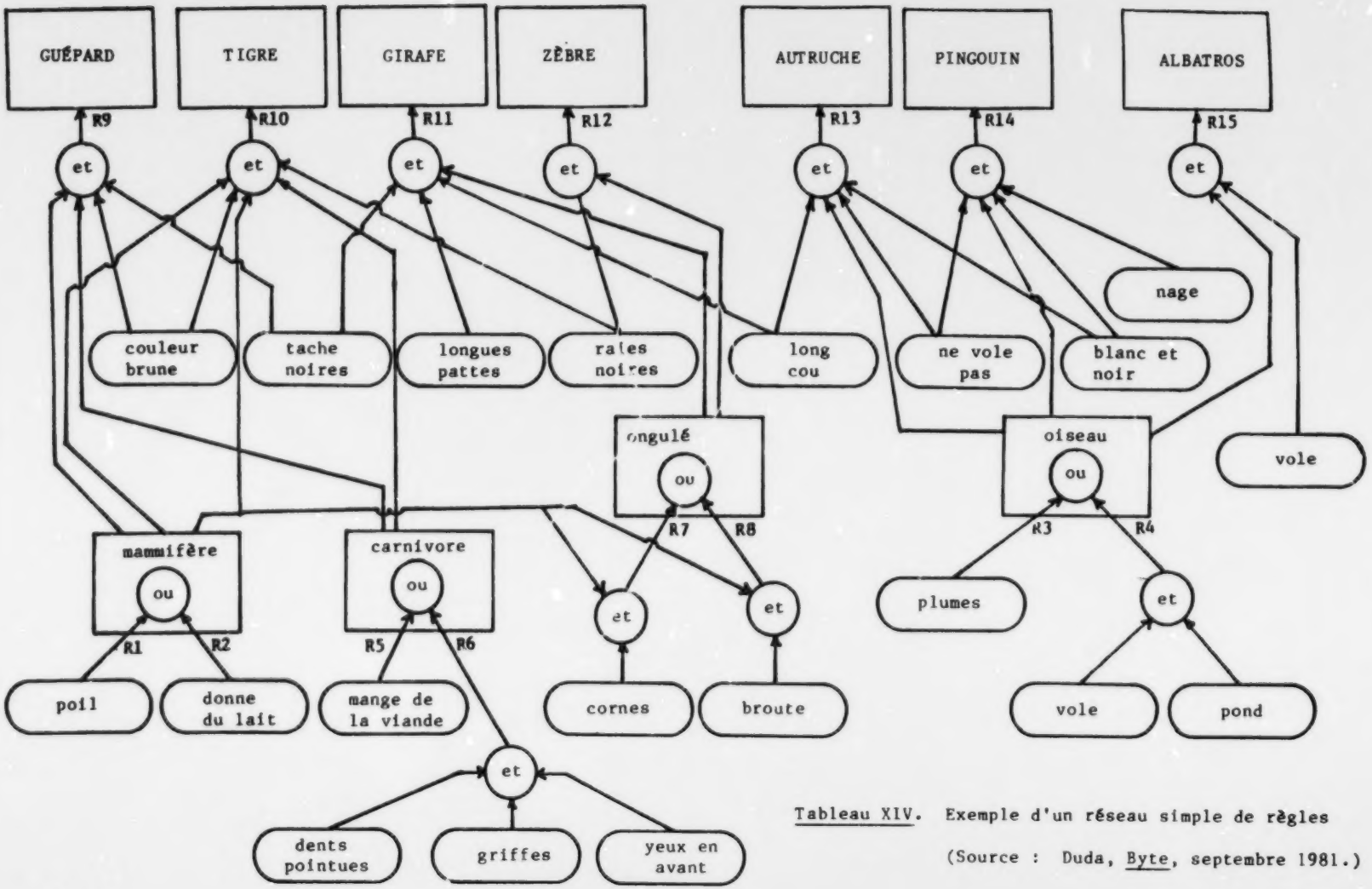


Tableau XIV. Exemple d'un réseau simple de règles

(Source : Duda, Byte, septembre 1981.)

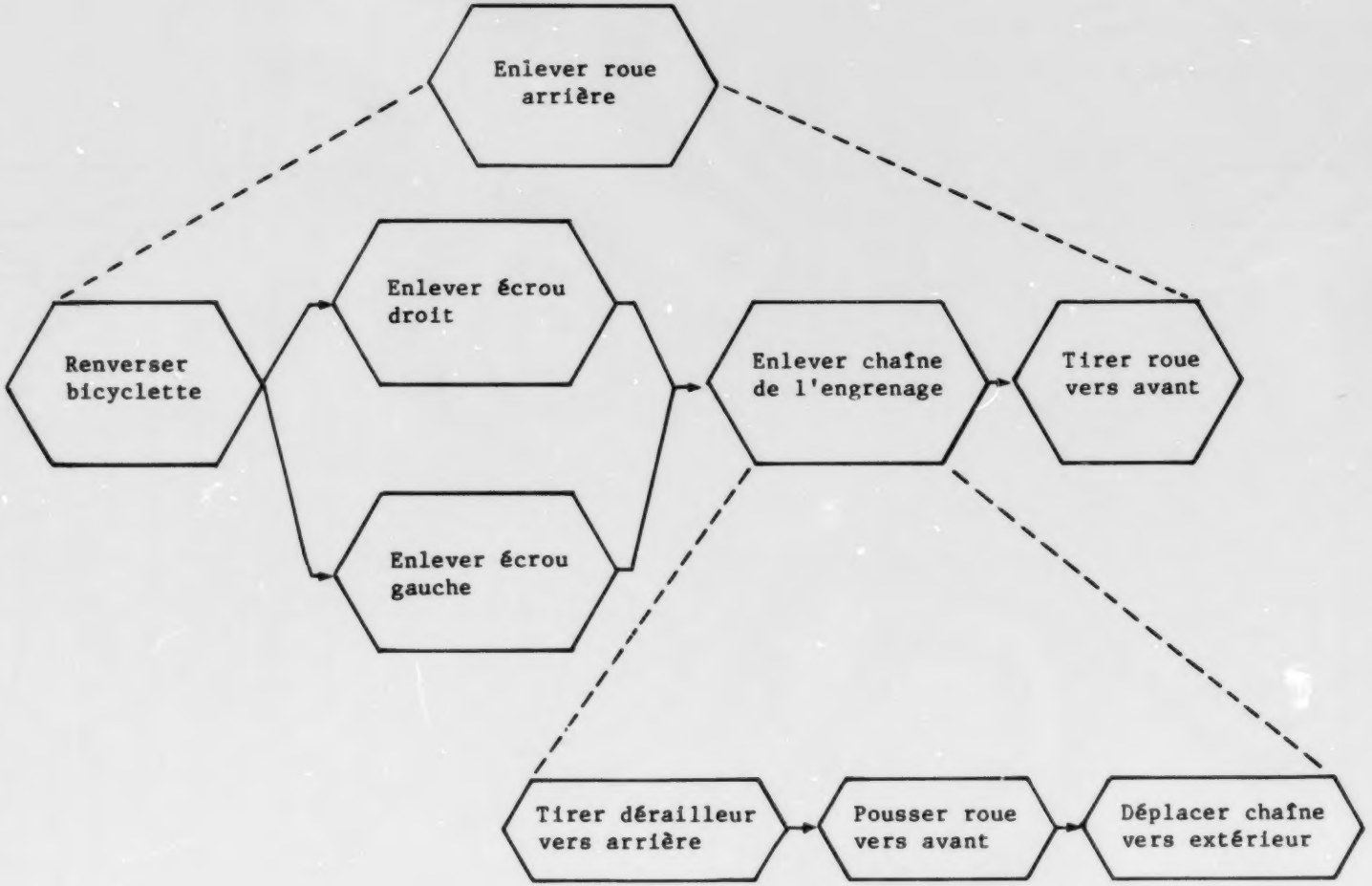


Tableau XV. Exemple de réseau basé sur des relations de cause à effet.

(Source : Letendre A., La prochaine génération de logiciels : l'intelligence artificielle MEST, 1983.)

L'exemple cité ci-dessus se lit comme suit : John est à Paris, quelqu'un se trouvant à Paris n'est pas loin du Louvre, donc John n'est pas loin du Louvre.

Seulement deux systèmes empruntant le raisonnement déductif ont été créés : EXPERT EASE et TIMM. Cependant, ce moyen devrait devenir plus populaire avec l'arrivée du langage Prolog (PROgrammation en LOGique).

Pour plus d'information sur ces différentes techniques, veuillez consulter le numéro spécial de IEEE Computer, d'octobre 1983.

D'une façon générale, il est important de se rappeler que l'approche retenue doit être intimement reliée à la nature du problème à résoudre.

1.1.2 Système à raisonnement par inférence et fonctionnement

Le système à raisonnement par inférence est constitué d'une séquence d'opérations logiques permettant de manipuler et de combiner les règles de la banque de connaissances. Il s'agit en fait d'un interprète de règles qui a pour rôle de comparer des chaînes de caractères, de les fusionner, de les séparer et de substituer une chaîne par une autre. En voici quelques exemples très généraux.

- Le système DENDRAL dérive des contraintes à partir des données puis il génère une série de structures possibles. A partir de celles-ci, le système prédit les spectrographes de masse correspondants qu'il compare ensuite avec les données initiales.

- Le système XCON de Digital Equipment attaque le problème en le divisant en étapes : corriger les fautes dans le bon de commande, mettre les composantes dans le cabinet de l'ordinateur, installer les câbles, etc. Le système entreprend une étape, la termine, puis il passe à la suivante, et ainsi de suite.

- Le système MYCIN utilise, quant à lui, une tactique différente. Il s'attarde à chaque hypothèse de diagnostic et évalue si les données appuient celle-ci. Il cherche un traitement médical pour tous les diagnostics qui semblent fortement plausibles.

De ces quelques exemples, on peut retenir le principe suivant : le système doit toujours commencer par passer en revue les connaissances de la banque; ceci nous amène

rapidement au problème de la multiplication rapide des combinaisons. Un des moyens de contourner la difficulté consiste à réduire le problème en fragments facilement manipulables. On peut aussi demander au système de produire toutes les solutions possibles et d'éliminer les branches de l'arbre de décision qui ne satisfont pas certains critères pré-établis.

Le système cherche donc une règle qui puisse satisfaire la ou les conditions et la met à exécution. Pendant cette phase, l'état du système et de la banque de données change. En effet, certaines règles nouvelles sont alors mises à disposition et d'autres mises de côté.

L'interprète de règles (la structure de contrôle) se sert d'une stratégie précise pour trouver les règles en vigueur et pour les appliquer; parallèlement, il s'assure que le système dépouille le plus efficacement possible les données dans l'espace de travail.

Nous avons mentionné plus tôt que les diverses règles étaient enchaînées et formaient un raisonnement. Les principales approches utilisées pour fouiller cet ensemble de règles sont les enchaînements " vers l'avant " (" forward chaining "), ou " à rebours " (" backward chaining "); on peut aussi combiner ces deux approches.

Dans la stratégie faisant appel aux enchaînements vers l'avant (" forward chaining "), le système passe en revue les règles jusqu'à ce qu'il en trouve une dont la prémisse (la partie " si " de la règle " si...alors ") corresponde à l'information disponible. Le système met alors à disposition cette règle et en écarte d'autres, puis, il procède à l'application de cette règle, met à jour la banque de données et recommence ce même processus jusqu'à ce que le but soit atteint ou qu'il n'y ait plus de règles disponibles. Cette approche est aussi appelée la stratégie entraînée par les données (" data-driven "), puisque les données sont le point de départ du processus, le but à atteindre n'étant pas connu.

Un des problèmes liés à cette approche est que le système va tenter de dériver toutes les branches possibles de l'espace de travail.

Cette stratégie a été utilisée avec succès dans les problèmes d'analyse de données, de conception, de diagnostic et de formation de concepts.

Il existe aussi une approche semblable à celle dont il vient d'être question, la stratégie entraînée par les événements. Chaque étape est basée sur de nouvelles données ou d'après les résultats des étapes précédentes : le système réagit donc

à des événements. Cette stratégie est utilisée dans le cas de situations qui changent dans le temps, principalement dans les opérations en temps réel comme le contrôle et la surveillance. Elle peut aussi être appliquée à la planification.

En ce qui concerne l'enchaînement à rebours (" backward chaining "), le système part d'une conclusion connue et essaie de trouver une règle qui mène à cette conclusion. Le système connaît la partie " alors " de la règle " si...alors ". Il passe en revue les règles et tente d'en trouver une dont les prémisses mènent à la conclusion qu'il connaît. Si, après une première revue, le problème n'est pas résolu, le " si " devient le nouvel objectif et le système cherche quelle règle mène à celui-ci. Le processus est appliqué de façon récursive jusqu'à ce que le problème soit résolu, à défaut de quoi le système demandera à l'utilisateur de l'information supplémentaire.

Cette stratégie est utilisée quand le but est connu ou dans les cas où le système peut formuler une hypothèse qu'il tentera de vérifier par la suite. C'est pour cette raison qu'on appelle aussi cette approche " stratégie entraînée par les buts " (" goal-driven "). En d'autres termes, le but ou les conclusions sont connus et le système tente de trouver l'enchaînement de régles qui mène à ce but. Si on voulait en donner un exemple concret, on pourrait choisir celui d'un moteur ne démarrant pas; dans ce cas-là, on connait l'effet et on cherche la cause.

Cette stratégie, surtout utilisée pour les problèmes de diagnostic (p.ex. MYCIN) ou de planification, a un côté négatif : s'il y a trop de sous-buts à satisfaire, il peut rapidement y avoir une multiplication rapide des combinaisons.

Il est également possible de combiner les stratégies mentionnées plus haut. Par exemple, on peut utiliser, en premier lieu, une stratégie entraînée par les données pour élaborer un ensemble d'hypothèses à partir des données et utiliser chaque hypothèse comme si elle était un but. Puis, quand de nouveaux faits sont découverts dans la recherche à rebours, le système vérifie si de nouveaux buts sont suggérés.

Un autre exemple de combinaison de stratégie serait celui de la " relaxation convergente ", où les enchaînements dits vers l'avant et à rebours sont combinés; les solutions générées par chaque stratégie sont combinées à un point intermédiaire. Cette stratégie est utilisée dans les cas où il y a beaucoup d'incertitude, par exemple dans le domaine de la reconnaissance de la parole.

Il serait utile de noter que bien que les règles soient toutes établies à l'avance, il n'est pas possible de déterminer de façon anticipée l'usage que le système en fera. Aussi le système EURISKO, conçu pour découvrir de nouveaux concepts, a été utilisé pour jouer au jeu informatique Traveller. A la grande surprise de tous, le système a fait feu sur certains de ses propres vaisseaux spatiaux pour augmenter sa force, la vitesse de la flotte étant déterminée par la vitesse de ses vaisseaux les plus lents. Le système a choisi de ne garder qu'une flotte de très petits vaisseaux extrêmement rapides. Puisque personne n'avait pensé à cette tactique, EURISKO a gagné le tournoi.

Une nouvelle approche vient de voir le jour, celle qui consiste à se servir d'une " métaconnaissance " portant sur le contenu de la banque de connaissances et sur les diverses tactiques permettant de choisir une stratégie appropriée. Il s'agit en fait d'un système expert à l'intérieur du système expert. Ainsi, suivant le contexte, le système en question pourrait examiner seulement quelques groupes de règles ou encore, il pourrait changer l'ordre des règles afin de les passer en revue plus efficacement.

Voici un exemple de " métarègle " tiré du système EURISKO :

> Si tous les éléments d'un ensemble satisfont de façon non prévisible à une propriété rare, il faut alors accroître le niveau d'intérêt de cet ensemble et celui des heuristiques qui ont conduit à sa définition.
>
> (Lenat, 1984)

Un autre exemple de " métarègle " consisterait à traiter les autres règles comme des données. On pourrait alors avoir la métarègle suivante : " si le degré de certitude d'une règle tombe à moins de 20 %, alors il faut l'éliminer ".

Le tableau XVI indique quelles sont les stratégies utilisées pour quelques systèmes. Il semble que jusqu'à maintenant la stratégie de l'enchaînement vers l'avant (" forward chaining ") soit la plus utilisée.

1.1.3 Interface homme-machine

La très grande majorité de ces systèmes communiquent avec l'utilisateur par l'intermédiaire d'un langage naturel (en opposition à un langage formel du genre Fortran ou Basic). Cette communication n'est évidemment possible que dans un domaine très restreint et que si l'on utilise un mode de conversation relativement stylisé.

La plupart des systèmes ne communiquent qu'en cherchant certains mots-clés ou en élaborant des phrases à partir de gabarits prédéterminés. S'il y a ambiguïté, le système demandera des éclaircissements ou de l'information supplémentaire, une évaluation du degré de certitude, par exemple.

Un des aspects les plus intéressants des systèmes experts est leur capacité à expliquer leur raisonnement. Le processus est d'une simplicité déconcertante. Le système imprime tout simplement l'enchaînement de règles qu'il a utilisé et qui forme son raisonnement. L'explication peut être en langage naturel ou non. Il est à noter que cette approche n'est pas satisfaisante quand un très grand nombre de règles ont été utilisées. On fait actuellement des recherches en vue d'en arriver à concevoir un système capable, même dans ce cas, d'expliquer son raisonnment de façon plus succincte.

Cette faculté est d'une extrême importance car même les experts n'oseraient pas utiliser le système à moins de comprendre le raisonnement ayant motivé chacune de ses recommandations ou chacune de ses conclusions. De plus, cette faculté facilite la recherche des erreurs dans le système ainsi que les modifications ultérieures.

Vous trouverez à la page 54 un exemple de dialogue entre un système et son utilisateur.

1.2 Ordinateurs

Bien que les systèmes experts puissent fonctionner sur des mini-ordinateurs conventionnels et que certains systèmes simples fonctionnent sur un ordinateur personnel, des ordinateurs ont été spécialement conçus pour les applications de l'intelligence artificielle.

Ce sont des machines qui ont été optimisées pour traiter le langage Lisp (LISt Processing). On en met actuellement au point d'autres pour traiter le langage Prolog (PROgramation en LOGique).

			Stratégie			
Système	Fonction	Domaine	Enchaînement vert l'avant	A rebours	Combinaison	Entraînée par les événements
Mycin	Diagnostic	Médecine		X		
Dendral	Interprétation de données	Chimie	X			
EL	Analyse	Circuits électroniques	X			
Guidon	Formation	Médecine				X
KAS	Acquisition de connaissances	Géologie	X			
Meta-Dendral	Apprentissage	Chimie	X			
AM	Formation de concepts	Mathématiques	X			
VM	Surveillance	Médecine				X
GAI	Interprétation de données	Chimie	X			
EXCON	Conception	Ordinateurs	X			
ABSTRIPS	Planification	Robotique		X		
NOAH	Planification	Robotique		X		
Molgen	Conception	Génétique			X	
SYN	Conception	Circuits électroniques	X			
HEARSAY-II	Interprétation de signaux	Reconnaissance de la parole			X	
Harpy	Interprétation de signaux	Reconnaissance de la parole	X			

Tableau XVI. Stratégies utilisées par les machines à raisonnement par inférence de quelques systèmes experts

(Source : Miller K. The 1984 Inventory of Expert Systems.)

Ces ordinateurs très dispendieux coûtent entre 30 000 $ et 70 000 $ US en moyenne. Les prix ont cependant commencé à chuter. Ils sont tous dotés d'une mémoire centrale de grande capacité, d'unités de disques puissantes, d'écrans à haute résolution et souvent de services comme des éditeurs de texte et de graphisme. Tous, enfin, comportent une souris reliée à un système de fenêtres ayant pour but de faciliter l'inspection du système. Ainsi, on peut examiner le contenu d'un nœud du réseau et les relations de ce dernier avec les autres nœuds.

Le tableau XVIII présente la liste des ordinateurs Lisp disponibles sur le marché. A cette liste, s'ajouteront bientôt, si ce n'est déjà fait, des machines fabriquées par Apollo Computer, Data General, Digital Equipment, Hewlett-Packard and Sperry.

```
Please enter information about the patient.

      Name      Age        Sex       Race
1) ** Pt219     42 YEARS   FEMALE    CAUCASIAN

2) Are there any positive cultures obtained from Pt219?
** NO
3) Are there any pending cultures of Pt219?
** YES

      site      date       stain     method of
                collected  examined? collection
                                     [urine,sputum only]
4) ** CSF       3-Jun-75   YES       N/A

      stain of smear      morph
      [type NONE if no organism was seen on the smear]
5) ** NONE
```

(more questions)

```
13) Has Pt219 recently had symptoms of persistent headache or other
    abnormal neurologic symptoms (dizziness, lethargy, etc.)?
** YES
14) Has Pt219 recently had objective evidence of abnormal neurologic
    signs (nuchal rigidity, coma, seizures, etc.) documented by
    physician observation or examination?
** YES

The CSF cultures will be considered to be associated with MENINGITIS.

34) Is the meningitis a hospital-acquired infection?
** NO
35) Is Pt219's clinical history consistent with EPIGLOTTITIS?
** NO
36) Is Pt219's clinical history consistent with OTITIS-MEDIA?
** NO
37) Has the patient ever been to an area that is endemic for
    coccidiomycoses?
** UNKNOWN
38) Is Pt219 a burn patient?
** WHY

[i.e. WHY is it important to determine whether PATIENT-219 has been
seriously burned?]

[4.0] This will aid in determining the organisms (other than those
      seen on cultures or smears) which might be causing the infection.
  It has already been established that
     [4.1] the infection which requires therapy is meningitis, and
     [4.2] organisms were not seen on the stain of the pending csf
           culture (CULTURE-1), and
     [4.3] the type of the infection may be bacterial
  Therefore, if
     [4.4] Pt-219 has been seriously burned
  then
     there is suggestive evidence that Pseudomonas-aeruginosa is one
     of the organisms (other than those seen on cultures or smears)
     which might be causing the infection
  Author: Yu
  [RULE578]

   [back to question 38...]
   ** HOW 4.3
```

```
[i.e. HOW was it established that the type of the infection may be
bacterial?]

The following rules concluded about: the likelihood that the type
of the infection may be bacterial

              Rule          Yes       No

     [4.5]    RULE500       (.4)
     [4.6]    RULE501                 (.17)
     [4.7]    RULE502       (.1)
     [4.8]    RULE524       (.42)
     [4.9]    RULE504       (.28)

Thus, it has been established that the type of the infection may be
bacterial.
```

My therapy recommendations will be designed to treat for organisms that either are very likely or, although less likely, would have a significant effect on therapy selection if they were present. It is important to cover for the following probable infection(s) and associated organism(s):

```
INFECTION-1 is MENINGITIS

  + <ITEM-1>  MYCOBACTERIUM-TB [from clinical evidence only]
  +     ...   COCCIDIOIDES     [from clinical evidence only]
  +     ...   CRYPTOCOCCUS     [from clinical evidence only]

   43) Does Pt219 have a clinically significant allergic reaction to any
       antimicrobial agent?
   ** NO
                [Considering ETHAMBUTAL-AND-INH-AND-RIFAMPIN
                 for use against INFECTION-1...]
   44) Is Pt219 pregnant or breast feeding?
   ** NO
   45) Do you have reason to suspect that Pt219 may have impaired renal
       function?
   ** NO
   46) Pt219's weight in kilograms (or <number> POUNDS):
   ** 51.3

[REC-1] My preferred therapy recommendation is as follows:
        Give the following in combination:
        1) ETHAMBUTAL
        Dose: 1.28g (13.0 100mg-tablets) q24h PO for 60 days
              [calculated on basis of 25 mg/kg]
              then 770 mg (7.5 100mg-tablets) q24h PO
              [calculated on basis of 15 mg/kg]
           [The dose should be modified in renal failure.
           I can adjust the dose only if a creatinine clearance
           or a serum creatinine is obtained.]
        Comments: Periodic vision screening tests are recommended
                  for optic neuritis.

        2) INH
        Dose: 513 mg (5.0 100mg-tablets) q24h PO
              [calculated on basis of 10 mg/kg]

        3) RIFAMPIN
        Dose: 600 mg PO q24h
        Comments: Administer dose on an empty stomach
```

Although I suspect that fungus may be a possible pathogen, in the absence of definitive evidence, I will not recommend antifungal therapy at this time. Please obtain samples for fungal, TB, and viral cultures, cytology, VDRL (blood and CSF), coccidioides complement-fixation (blood and CSF), cryptococcal antigen (blood and CSF), viral titers (blood and CSF). An infectious disease consult may be advisable.

Tableau XVII. Exemple de séance de communication avec le système Mycin.

L'utilisateur répond aux questions de Mycin aux lignes débutant par deux astéristiques (**). A la ligne 38, Mycin explique son raisonnement.

(Extrait d'un article de : Duda et Shortliffe, " Expert Systems Research ", Science, 15 avril 1983, p. 261-268.)

Fabricant	Modèle	Prix $ US
Lisp Machine Inc. (Culver City, Calif.)	LISP Machine	80 000 $
	Lambda Machine	n.d.
	Picon Machine	150 000 $
Bolt, Beranek & Newman (Cambridge, Mass.)	Jerico	n.d.
Symbolics Inc. (Woodland Hills, Calif.)	LM-2	75 000 $
	3600	60 000 $
Three Rivers Computers Inc. (Pittsbury, Penn.)	Perq	25 000 $
Texas Instruments (Austin, Texas)	Explorer	52 000 $
Xerox Electro-optical Systems, (El Segunda, Calif.)	1100	45 000 $
	1108	27 000 $
	1132	180 000 $

Tableau XVIII. Ordinateurs Lisp disponibles sur le marché.

2. Évaluation de la technologie

2.1 Système expert idéal

Avant d'évaluer les systèmes experts existants et ceux en cours de réalisation, il faut tout d'abord établir une norme de comparaison. Celle-ci est basée sur la notion de système expert idéal. Cet expert idéal a les caractéristiques suivantes :

- il peut résoudre les problèmes de sa spécialité;
- il explique les raisons de son choix;
- il apprend grâce à l'expérience;
- il restructure ses connaissances grâce à l'expérience;
- il rompt les règles établies quand c'est nécessaire;
- il détermine si l'information est appropriée;
- son rendement se dégrade graduellement à mesure qu'il se rapproche de ses limites.

2.2 Avantages et utilité des systèmes actuels

Jusqu'à présent, ce rapport a certainement fait la preuve des avantages que présentent les systèmes experts : ils travaillent sans se fatiguer, ils sont immortels, ils sont faciles à améliorer et à entretenir, en comparaison aux programmes d'ordinateur conventionnels, et enfin, on peut les améliorer et les reproduire quand on le désire.

Ils présentent d'autres avantages comme :

- une mise à disposition permanente de la compétence humaine;
- une plus grande accessibilité à cette compétence;
- la possibilité, pour l'expert humain, d'avoir sous la main une seconde source d'opinion;
- l'exploration d'autres avenues grâce à des questions du genre " qu'est-ce que...si... " dans un domaine donné;

- la possibilité de résoudre des problèmes requérant de grandes connaissances dans les situations où les données sont incomplètes et où il n'y a pas d'expert disponible;

- l'occasion de résoudre des problèmes qui ne peuvent être résolus ni par des humains ni par des techniques informatiques conventionnelles, comme dans les cas où un très grand nombre de solutions doivent être explorées.

Une fois de plus, c'est le système XCON qui peut nous fournir un exemple de l'utilité des systèmes experts.

Chez Digital Equipment, la conception d'un ordinateur peut comprendre un millier d'étapes distinctes et requérir de 25 à 125 informations différentes sur chacune des quelque 7000 composantes pouvant entrer dans la fabrication dudit ordinateur. Il s'agit là d'une quantité énorme d'informations à contrôler, surtout, si l'on considère qu'aucun être humain ne peut évaluer toutes les interrelations possibles. Par exemple, l'addition d'un élément optionnel peut indirectement impliquer l'ajout d'un nouveau " bus " et d'une nouvelle plaque d'assemblage. Jusqu'à présent, XCON a rempli quelque 150 000 commandes.

2.3 Rendement

Comme nous le verrons ci-dessous, bien que les rendements des systèmes experts soient parfois surprenants, du moins si on se fie à quelques exemples bien choisis, en général peu de systèmes l'emportent sur les experts humains.

Le système DIPMETER (analyse de données de prospection pétrolière) donne une interprétation correcte quatre-vingt-dix fois sur cent. En ce qui concerne le système XCON, il est juste de quatre-vingt-quinze à quatre-vingt-dix-huit fois sur cent, probablement à cause de toute l'expérience qui a été acquise avec ce système.

Le système PROSPECTOR a utilisé des données géologiques, géophysiques et géochimiques obtenues lors d'explorations préliminaires pour identifier et localiser avec succès un gisement de molybdène dans la région du Mont Tolman dans l'état de Washington. Il faut cependant préciser que le système n'a toutefois pas été capable d'estimer l'étendue du gisement.

Le système CADUCEUS a été utilisé expérimentalement à Pittsburg. Dans le cas d'un malade dont les symptômes intriguaient les médecins, le système a rapidement identifié

sa maladie comme étant l'amyloïdose systémique, une maladie rare et parfois mortelle qui se caractérise par une concentration de protéine dans les organes vitaux, concentration qui finit par les détruire. Une biopsie du foie confirma ultérieurement ce diagnostic.

2.4 Limites

Quoi qu'on ait pu laisser entendre jusqu'à présent, les systèmes experts sont quand même assez limités surtout parce qu'ils en sont encore au tout début de leur cycle de vie. En fait, on ne sait pas très bien pourquoi certains " designs " de systèmes-experts sont convenables alors que d'autres ne le sont pas.

2.4.1 Limites dues aux formes de représentation

Les utilisations actuelles des systèmes experts sont limitées par les schèmes de représentation disponibles, ce qui veut dire que les utilisations sont souvent restreintes aux domaines où des règles de type " si...alors " peuvent être appliquées.

De plus, certaines connaissances comme les processus, la notion de croyance, les fonctions, les formes ainsi que les systèmes dynamiques sont difficiles à représenter sur ordinateur. Toutefois, on a trouvé des moyens intéressants de représenter la notion de certitude et de temps.

En fait, le degré de certitude est un des premiers problèmes de représentation auquel on s'est attardé. On a vite eu recours à des probabilités ou à des valeurs de certitude (indiquant le degré de confiance d'une prémisse) fixées par l'expert élaborant le système. Par exemple, chaque règle de MYCIN est accompagnée d'un degré de certitude. Il existe une méthode plus perfectionnée, mais encore au stade expérimental, celle de la logique floue qui est un continuum de valeurs entre le vrai et le faux.

La notion de temps a cependant été beaucoup moins étudiée. On peut l'aborder par le calcul situationnel, inventé par McCarthy et Hayes, qui utilise des séquences d'actions. Cette approche fait appel à la notion de " situations" qui ne changent que lorsque suffisamment d'actions ont eu lieu ou quand les données indiquent une nouvelle situation. Chaque situation détermine ce qui change et ce qui demeure fixe à travers un " cadre " décrivant une situation stéréotypée. Le système VM utilise cette approche pour surveiller la respiration d'un patient.

Les règles constituent un moyen trop limité de représentation des connaissances, puisqu'elles éliminent complètement les nuances et qu'elles cachent les relations causales qui ne sont qu'implicites dans cette forme de représentation. Les autres approches sont tout aussi limitatives et rigides.

Le secret du succès dans l'avenir sera peut-être d'en arriver à pouvoir combiner l'utilisation de règles pour les problèmes de routine et de logique pour les problèmes plus complexes.

Il existe également un autre problème : les systèmes actuels ne sont applicables qu'à des domaines très restreints. Ainsi, PUFF se limite aux seules fonctions pulmonaires. Le système CADUCEUS, quant à lui, serait plus efficace s'il possédait des connaissances d'anatomie ou s'il connaissait l'évolution chronologique des diverses maladies.

On ne consulte normalement qu'un seul expert lors de l'élaboration du système; ceci assure la cohérence et l'uniformité du produit final, car les règles doivent souvent collaborer. Par exemple, une certaine règle ne se mettra en action que si une autre a été utilisée. C'est pour cette raison qu'il est difficile de construire des systèmes pluridisciplinaires. Pour remédier à cette carence, on pourrait utiliser des sous-systèmes, chacun travaillant sur un aspect du problème et combinant les résultats à la fin. Ces sous-systèmes échangeraient des messages dans un espace de travail commun appelé tableau noir (" blackboard ").

Une des principales limites des systèmes actuels provient du fait qu'ils n'ont qu'une connaissance superficielle c'est-à-dire heuristique, basée sur l'expérience, sur la reconnaissance de faits saillants. Ils n'ont pas de connaissances profondes, c'est-à-dire des connaissances sur les principes de base, la structure, les fonctions et les comportements des objets ainsi que les relations causales. En bref, ils n'ont pas une connaissance du monde. Par exemple, aucun des systèmes experts utilisés en médecine ne sait ce qu'est un être humain. A titre d'exemple, le système PUFF, qui est spécialisé dans les maladies du système pulmonaire, ne serait d'aucune utilité à un chirurgien car il ignore que les poumons sont à l'intérieur du corps.

Les connaissances superficielles correspondent aux connaissances du mécanicien qui peut ajuster un carburateur sans toutefois savoir pourquoi ce qu'il fait en améliorera le fonctionnement. Les connaissances profondes correspondent à celles de l'ingénieur qui comprend tous les aspects du fonctionnement d'un carburateur et qui peut prédire le résultat de ses manipulations et l'expliquer.

Une des conséquences de cette connaissance superficielle est que les systèmes ne savent pas quand il est bon de rompre les règles et qu'ils n'ont aucun moyen de faire la différence entre ce qui est pertinent et ce qui ne l'est pas. Ils ne connaissent pas l'esprit des règles et ignorent ce qui peut ou ne peut pas être fait. De fait, ils n'ont aucune idée de leurs limites.

Cette limite peut être lourde de conséquences. Ainsi, le système MYCIN ne prescrira jamais de tétracycline à un enfant de moins de 8 ans car celle-ci tache les dents des jeunes enfants. De toute évidence, les préjudices portés à l'esthétique doivent être acceptés s'il s'agit de sauver une vie.

Voici d'autres problèmes de représentation :

- Certains problèmes exigent l'utilisation de plus d'un type de représentation et ne peuvent être aisément manipulés par une seule stratégie ou une seule machine à raisonnement par inférence. En reconnaissance de la parole, les problèmes de syntaxe, de phonétique et de fréquence spectrale en sont quelques exemples.

- D'autres requièrent l'utilisation d'un nombre de règles tel, qu'il est impossible de les gérer. Par exemple, un système destiné à conseiller sur les réparations de pannes doit contenir de l'information sur toutes les pannes possibles et imaginables. Il ne lui suffit donc pas de connaître un ensemble de règles sur la détection ainsi que la façon de remédier aux problèmes.

2.4.2 Limites reliées à l'acquisition des connaissances

L'acquisition de connaissances se définit par la recherche, la compilation et la codification de l'information pour le système original, ainsi que par les mises à jour ultérieures qui comprennent l'inclusion, l'élimination ou la modification de règles. Ceci implique qu'une information doit être évaluée tout comme doivent l'être son interaction avec les autres règles, ainsi que le choix d'une forme de représentation et d'une structure initiale représentant le domaine choisi.

Soutirer à l'expert ses connaissances est souvent un processus laborieux car celui-ci est rarement pleinement conscient de l'approche qu'il adopte pour solutionner un problème. De plus, il lui est généralement très difficile de s'exprimer d'une façon compatible avec le formalisme des méthodes de représentation de la connaissance.

Cette phase de l'élaboration d'un système expert est normalement menée par un spécialiste appelé " ingénieur en connaissances ". Comme on s'en doutera, un contact étroit doit s'établir entre l'expert et cet ingénieur. Il faudra veiller à assurer la continuité de cette collaboration puisque l'élaboration d'un système expert peut prendre de un à deux ans.

Certains outils peuvent être utilisés pour faciliter l'élaboration d'un système. Les plus simples prennent la forme d'éditeurs et permettent d'introduire et de modifier des règles. Dans la section sur l'élaboration des systèmes experts, nous nous attarderons sur quelques outils disponibles dans le commerce, entre autres sur les squelettes de systèmes, auxquels il n'est souvent besoin que de remplir des espaces laissés en blanc. D'autres seraient des interfaces intelligentes permettant d'interviewer l'expert ou encore des systèmes experts spécialisés dans le domaine du " génie de la connaissance ".

Par exemple, le système TEIRESIAS aide l'expert à élaborer ou à modifier un système basé sur une structure similaire à MYCIN. Ce système se sert d'un modèle de la banque de connaissances de MYCIN pour déterminer si les nouvelles informations peuvent être amalgamées à l'information déjà codée. Le système utilise ce modèle pour faire des suggestions à l'expert interviewé.

IBM est en train de mettre au point un squelette de système qui comprendra des cadres et des règles de raisonnement par inférence ainsi que des mécanismes permettant d'interroger l'utilisateur et d'expliquer le processus de raisonnement utilisé par le système. De plus, le système comportera un mécanisme permettant d'extraire des données d'autres systèmes, par exemple celles de capteurs ou de banques de données. Ceci devrait réduire sensiblement le nombre de questions auxquelles doit répondre l'utilisateur. Par exemple, un système spécialisé dans le diagnostic des pannes d'ordinateur pourrait obtenir ses données directement de l'ordinateur examiné.

Puisque l'acquisition des connaissances est une pierre d'achoppement dans la mise au point des systèmes experts, à long terme, un mécanisme devra être conçu pour permettre aux systèmes d'apprendre par eux-mêmes. Ainsi, par exemple, le système pourrait déduire les règles à partir d'exemples ou lire directement un livre sur le sujet qu'il traite.

Peu de systèmes, même au stade expérimental, ont la capacité d'apprendre par eux-mêmes. Le système META-DENDRAL est un système expert qui simule le processus d'élaboration d'une théorie pour générer des règles générales de fragmentation en spectroscopie de masse. Ces règles ont la même forme que celles utilisées par DENDRAL. La méthode utilisée par

META-DENDRAL consiste à générer, vérifier et raffiner un ensemble de règles obtenues à partir de spectres. Les règles ainsi obtenues sont en général de bonne qualité.

Le systèm EURISKO procède différemment. Il dérive de nouvelles heuristiques associées à de nouveaux concepts au fur et à mesure que ceux-ci sont découverts. Le système " raisonne " donc par analogie. Dans l'exemple de la conception d'une flotte spatiale cité précédemment, EURISKO a conçu une flotte de forme symétrique parce que c'était un concept appris dans la conception de circuits intégrés.

Le système INDUCE/PLANT, quant à lui, déduit des diagnostics concernant les maladies chez les plantes à partir de données sur les symptômes. En résolvant des problèmes de calcul intégral, le système LEX apprend de nouvelles heuristiques pour sélectionner les régles à appliquer.

La vérification de la validité de l'information codée est un autre problème, car aucune méthodologie ne permet de s'assurer a priori que l'information codée sera intelligible et utilisable.

2.4.3 Limites dues à la machine à raisonnement par inférence

De nouvelles méthodes doivent être conçues pour permettre le dépouillement de très grandes banques de données dans un temps raisonnable.

En effet, on ne maîtrise toujours pas la gestion et le depouillement efficace de banques de données très importantes. L'efficacité tend à se dégrader rapidement quand la base de connaissances grossit. De fait, si le système contient plus de quelques milliers de règles, il devient impératif d'utiliser des métarègles pour réduire l'espace de travail. L'arrivée de nouvelles architectures de traitement en parallèle pour les ordinateurs contribuera à amoindrir ce problème. D'un autre côté, on pourra également se servir de nouvelles méthodologies de gestion des banques de données.

Les schèmes de fonctionnement des machines à raisonnement par inférence sont encore très limités et peu variés. Ainsi, il n'existe pas encore de systèmes fonctionnant par analogie, par extrapolation, ou pouvant modifier les instructions ou tout autre comportement qu'un humain aura à sa disposition pour se tirer d'une situation difficile.

Les machines à raisonnement par inférence ont des mécanismes déterminés à l'avance, donc rigides. Elles seraient probablement plus efficaces si elles pouvaient, selon le problème, opter pour une stratégie plutôt que pour une autre.

Les systèmes experts éprouvent de graves difficultés devant des situations qui sortent de l'ordinaire ou qui n'ont pas été prévues. Par exemple, un système ne pourra faire face au problème posé par deux maladies présentes simultanément bien qu'il puisse résoudre séparément le problème à chacune d'elle. Ou encore, un système prévu pour conseiller sur la réparation des automobiles serait fort probablement totalement inutile dans le cas où une pomme de terre aurait été introduite de force dans le tuyau d'échappement. On est donc encore loin d'avoir créé des systèmes qui peuvent s'adapter à de nouvelles situations.

Quand on les pousse aux limites de leurs connaissances, les systèmes ont un rendement normalement très aléatoire et qui se détériore rapidement. Le rendement ne se dégrade pas graduellement comme on le désirerait parce que ces systèmes sont incapables de juger quand ils sont en dehors de leur spécialité. Jamais un système ne demandera d'aide en présence d'une situation nouvelle.

Les systèmes actuels n'ont aucun moyen de vérifier leurs conclusions pour en évaluer la plausibilité, ce qui conduit parfois à des recommandations réellement naïves.

2.4.4 Limites dues aux interfaces pour communiquer avec l'utilisateur

Les communications avec l'usager sont souvent rigides et stylisées et les explications limitées à une transcription des règles utilisées. Il serait désirable d'adapter les explications à l'usager, chose actuellement impossible car le système n'a aucun modèle de l'usager et de ce qu'il désire. Ainsi, les systèmes seraient-ils plus convaincants.

Les communications avec l'utilisateur sont parfois de si mauvaise qualité qu'il est nécessaire de faire appel à un spécialiste pour les utiliser. Les systèmes experts peuvent donc parfois être très difficiles à utiliser si on n'a pas reçu un entraînement adéquat pour utiliser chacun d'eux. Par exemple, quand on a transféré le système XCON du laboratoire à l'usine, le taux de réussite du système est tombé de 90 % à 60 % car les utilisateurs n'étaient pas habitués au système et utilisaient des données incorrectes. De plus, on réalisa alors que l'ensemble des problèmes réels étaient différents

de ceux que l'on avait identifiés auparavant. Cependant, il est vrai que tout logiciel demande une période de formation pour pouvoir être utilisé correctement.

2.4.5 Difficultés d'entretien

Les systèmes ne peuvent restructurer leur banque de connaissances automatiquement ce qui rend difficile une mise à jour rapide. (Il existe toutefois quelques systèmes expérimentaux qui ont cette capacité.)

Normalement, l'entretien du système doit être confié à un expert du domaine d'application ou à un " ingénieur en connaissances ".

2.4.6 Autres difficultés

D'autres difficultés proviennent :

- de la nature même des connaissances qui sont parfois incomplètes, inexactes, imprécises et presque toujours acquises de façon graduelle;
- des capacités limitées de mémoire et de la nature séquentielle des ordinateurs actuels;
- de la mise au point d'un système expert, qui, comme nous le verrons plus loin, peut être très laborieuse;
- du besoin pour un expert de revoir parfois les résultats afin d'en vérifier l'exactitude.

2.4.7 Conclusion

L'intelligence des systèmes experts actuels est de beaucoup inférieure à celle des humains. En fait, on pourrait comparer les systèmes experts aux savants idiots qui peuvent être de vrais génies dans des domaines très restreints tout en étant très déficients sur tous les autres plans intellectuels. Il est opportun de se rappeler que les systèmes experts ne font qu'imiter la compétence et qu'ils n'ont aucun sens commun, puisque ceci exigerait trop de connaissances de base.

2.5 R. et D. nécessaire

Buchanan (1981), qui a d'ailleurs été cité par plusieurs auteurs, identifie les besoins suivants en R. et D. :

- de meilleurs systèmes d'acquisition des connaissances incluant aussi bien des méthodologies pour en réduire le coût que des méthodologies pour sélectioner les problèmes appropriés;
- l'apprentissage par l'exemple;
- de meilleurs systèmes d'explication et des interfaces plus naturelles et plus faciles à utiliser;
- des outils d'élaboration améliorés;
- de meilleures architectures et des procédures de raisonnement par inférence améliorées;
- des techniques efficaces pour utiliser plusieurs experts et des connaissances provenant de sources variées;
- de meilleures techniques pour simuler le concept du temps;
- des méthodes pour bâtir de meilleures hypothèses et pour obtenir une meilleure connaissance du monde (p.ex. savoir qu'un poulet dans un four ne peut voler);
- l'habilité d'exploiter des modèles de cause à effet portant sur les phénomènes physiques et biologiques et de les utiliser conjointement avec d'autres connaissances;
- de nouvelles méthodologies pour le dépouillement de très grandes banques de connaissances;
- des formes de raisonnement analogique;
- des techniques pour utiliser des méthodes formelles de déduction;
- des techniques de traitement en parallèle;
- de nouvelles méthodes de représentation comme les modèles multiples (p.ex. circuits et boîtes noires en électronique).

De nombreux autres champs d'activité ont été identifiés tout au long du présent rapport. Cependant, d'autres auteurs ont identifié des domaines plus précis comme :

- des aides interactifs pour faciliter, examiner et valider l'identification des problèmes dans les grandes banques de données;

- la découverte automatique de nouvelles heuristiques;

- des méthodes pour déduire de nouvelles règles de raisonnement par inférence à partir de l'expérience passée;

- la représentation de la " physique naïve " (p.ex. un objet non soutenu tombera);

- de nouvelles formes de raisonnement (par défaut, par analogie ou par synthèse).

2.6 Le futur

2.6.1 Technologie

Les systèmes futurs auront, dans les années 1990, plus de 10 000 règles puis, vers la fin de la prochaine décennie, un million de règles. Ils seront basés sur des ordinateurs fonctionnant dans une architecture parallèle, car des machines très rapides seront nécessaires pour traiter ce grand nombre de règles.

Des moyens automatisés auront été découverts pour transposer divers documents directement dans la banque de connaissances. Ainsi, par exemple, un circuit électronique pourra être automatiquement transféré dans la banque de connaissances d'un système spécialisé dans le diagnostic du mauvais fonctionnement de circuits électroniques.

Avant 1990, on verra apparaître les premiers systèmes non basés sur des règles. Le début des années 1990 connaîtra les premiers systèmes dotés d'interfaces sophistiquées en langage naturel et la prolifération de cette technologie. Dès la fin de cette dernière décennie, on commencera à utiliser des systèmes capables d'auto-apprentissage.

Le tableau XIX, tiré du numéro spécial de la publication IEEE Spectrum sur les ordinateurs de cinquième génération, donne un bon aperçu de l'évolution future de la technologie.

Domaine	Systèmes actuels	Prochaine génération
Banque de connaissances	10^3 à 10^4 règles	10^6 à 10^8 règles
Acquisition de la connaissance	1 règle par heure	10 règles ou plus par heure Acquisition automatique
Interface	Langage stylisé Graphismes limités	Langage naturel Reconnaissance de la parole Vision artificielle

Tableau XIX. Évolution de la technologie

(Source : IEEE Spectrum, novembre 1983)

2.6.2 Applications

Déterminer les applications futures des systèmes experts à divers domaines peut être assez aléatoire à ce stade. Par exemple, la médecine a été un des champs d'application favori des systèmes experts. Pourtant, bien peu de systèmes sont utilisés de façon courante dans nos hôpitaux. Utilisés par un non spécialiste, de tels systèmes ne sont pas faits pour rassurer le patient. Toutefois, dans les mains d'un spécialiste, ils deviennent un outil précieux.

Les domaines où les systèmes experts peuvent être employés sont quasiment illimités. Ces systèmes pourraient faciliter la prise de décision dans le contrôle aérien, aider à synthétiser de nouveaux médicaments, assurer la coordination des opérations d'une usine, minimiser les temps morts dans la répartition des tâches, surveiller l'équipement, changer les plans de production afin de les maximiser, faire en sorte que les systèmes d'enseignement assisté par ordinateur s'ajustent au niveau de chaque étudiant.

A la maison, des systèmes experts pourraient donner des avis sur la réparation des fournaises, la nutrition, le jardinage et même aider à remplir ses formules de déclaration d'impôt. Il serait possible de concevoir un système qui lise les journaux, et qui fasse, selon les intérêts de chacun, une synthèse des événements susceptibles d'intéresser chaque lecteur.

Gevarter (1963) et Miller (1984) ont déterminé les créneaux suivants pour les systèmes experts dans différents domaines :

- génie civil
  conception, planification, répartition des tâches et contrôle

- équipement
  conception, surveillance, contrôle, diagnostic, entretien, réparation et formation

- commandement et contrôle
  analyse de l'information, planification, visée, évaluation des menaces et communications

- systèmes de défense
  identification des cibles, contrôle adaptif, guerre électronique

- professions
  consultations, formation et analyse en médecine, droit, comptabilité, gestion, finance et génie

- éducation
  enseignement, évaluation, diagnostic, formation de concepts et élargissement des connaissances à partir de l'expérience

- traitement des images
  interprétation des photographies, cartographie

- logiciels
  formation, spécification, conception, production, vérification et entretien

- consommateurs
  jeux intelligents, finances et investissements, achats, emplettes, extraction de l'information des banques de données

- agents intelligents
  aider l'utilisateur de systèmes informatiques

- bureautique
  systèmes intelligents

- processus de contrôle
  automatisation des usines

- exploration
  espace, prospection, etc.

2.6.3 Répercussions sociales

Nous sommes fort probablement en présence d'un nouveau Gutenberg. Les systèmes experts ont le potentiel de diffuser la compétence professionnelle là où on en a besoin. Par exemple, les zones rurales auront accès au même genre de connaissances médicales que les gens de la ville quand leurs médecins possèderont des systèmes experts spécialisés dans les grands domaines de la médecine. Un médecin pourra même être poursuivi pour ne pas avoir consulté un système expert.

On pourra accéder à ces systèmes en téléphonant simplement à une banque de systèmes experts. Déjà, le réseau SUMEX-AIM (Standord University Medical EXperimental computer for Artificial Intelligence in Medecine) permet à des terminaux extérieurs d'avoir accès aux ordinateurs des universités de Stanford et Rutgers (N.J.).

Ainsi, chacun d'entre nous pourra plus facilement profiter de l'ensemble des connaissances de la société. En fait,

beaucoup d'experts désireront, avant de prendre leur retraite, immortaliser leurs connaissances dans un système expert reproductible à volonté plutôt que d'écrire un livre.

L'utilisation abusive des systèmes experts pourrait créer une dépendance à leur égard et amoindrir l'esprit d'initiative. Cette technologie pourrait donc avoir comme effets néfastes de freiner certains progrès technologiques ou scientifiques en donnant des solutions stéréotypées à des problèmes perçus au préalable dans une perspective particulière.

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME EXPERT

1. Processus

De façon très générale, le processus d'élaboration d'un système expert est le suivant : on sélectionne et on définit un problème, on élabore un ensemble de sous-tâches, on code les connaissances requises, on évalue le système et on cherche à l'améliorer graduellement. Tout ceci se fait avec l'aide d'un spécialiste en systèmes experts.

Celui-ci, appelé aussi ingénieur en connaissances, interprète, intègre, répond aux questions, tire des analogies, cherche des contre-exemples et soulève certaines questions conceptuelles.

Plus précisément, on trouve et persuade un expert de coopérer à cette entreprise. L'ingénieur doit aussi lire la documentation disponible afin d'avoir un aperçu général du domaine et de se familiariser avec le jargon technique. On cerne alors le problème. Le point-clé ici est de bien comprendre la structure du problème afin de choisir une forme de représentation, une structure de la banque de connaissances et une structure de contrôle adéquates.

Il faut rappeler ici que les connaissances sont des faits, des heuristiques, des règles de bon jugement, des modèles et toute autre connaissance susceptible d'aider à la résolution du problème. Ceci inclut les connaissances de l'ingénieur, celles de l'utilisateur ainsi que des techniques générales de résolution de problèmes.

L'ingénieur en connaissances demande alors à l'expert de décrire de quelle façon il veut résoudre le problème. C'est un processus qui peut être très laborieux car, souvent, l'expert ne sera pas conscient des procédés qu'il utilise pour arriver à ses conclusions. Le rôle de l'ingénieur est d'aider l'expert à découvrir et à formuler clairement cette information. Par exemple, l'ingénieur en connaissances demande à l'expert si telle ou telle chose aurait du sens ou encore si telle ou telle tactique pourrait être utilisée. Il doit de plus vérifier si un procédé est généralement accepté ou s'il est particulier à l'expert. On comprend alors pourquoi le processus lié à " l'extraction " de l'expertise par un spécialiste humain peut être ardu.

L'étape suivante consiste à coder et à programmer le système. En termes pratiques, il faut codifer l'ensemble des règles, qui devient alors la banque de données permettant de résoudre

les problèmes. L'information est emmagasinée sous une forme telle qu'on peut y accéder grâce à des commandes en langage naturel.

On fait fonctionner le système et on essaie d'en corriger les erreurs en répétant les étapes précédentes. Parfois, l'expert dira que ce n'est pas ainsi qu'il résoudrait tel ou tel problème et on tentera alors d'améliorer les règles. On pourra aussi redéfinir le problème.

Il y a plusieurs moyens de vérifier le fonctionnement du système. Le plus commun consiste à donner au système un cas tiré d'un périodique spécialisé et à comparer la solution à ce qu'on trouve dans l'article. Avec MYCIN, les évaluateurs ne pouvaient savoir si le diagnostic provenait d'un conseiller, d'un interne, d'un étudiant en médecine ou d'un ordinateur.

Une fois le prototype terminé, on augmentera graduellement sa banque de connaissances en ajoutant des règles destinées à traiter les exceptions. Cet ajout se fera régulièrement aussi longtemps que le système sera utilisé. C'est pour cette raison que XCON, à sa sortie du laboratoire, n'avait que 200 règles et qu'il en a maintenant plus de 3000; cette augmentation est en partie due au fait que le système est maintenant utilisé pour toute la gamme des produits de Digital Equipment.

2. Outils pour faciliter l'élaboration

Heureusement, de nombreux outils facilitant l'élaboration d'un système expert sont disponibles dans le commerce. Les plus connus sont certainement les squelettes de systèmes experts. Ce sont des systèmes experts dont la banque de connaissances est vide. En d'autre termes, ce sont des systèmes auxquels on ajoute tout simplement des règles.

Ces outils comportent généralement une ou plusieurs techniques de représentation des connaissances et ils peuvent employer différents procédés de raisonnement selon les domaines. Ils comprennent souvent diverses interfaces facilitant l'interaction avec l'expert, comme des éditeurs et des mécanismes destinés à traduire des connaissances exprimées en anglais dans une forme compréhensible par la machine.

Grâce à ces squelettes, il est parfois possible de construire un premier prototype très simple en quelques jours seulement. Le tableau XX donne quelques exemples de squelettes, qui ne sont pas tous disponibles dans le commerce; de plus, cette liste est loin d'être complète.

Ces systèmes ne sont pas toujours faciles à comprendre et à utiliser. Certains n'ont pas été conçus pour être commercialisés, l'utilisateur étant donc totalement laissé à lui-même. Enfin, ils sont souvent basés sur une technologie dépassée.

Par contre, ils peuvent permettre d'économiser beaucoup de temps lors de l'élaboration d'un système expert. A titre d'exemple, Kinnucan (1984) rapporte qu'il n'a fallu que quatre mois pour mettre au point un prototype permettant de diagnostiquer les défaillances d'un réseau de télécommunications.

Le prix de ces outils varie considérablement selon ce que l'on cherche. Ainsi, le squelette SAGE de SPL en Grande-Bretagne coûte seulement 4000 $ can. pour une version fonctionnant sur Apple et 20 000 $ pour une version fonctionnant sur gros ordinateur. Texas Instruments vient tout juste de lancer un système pouvant comprendre jusqu'à 400 règles qui se vend seulement 3000 $ US. Une compagnie écossaise vend même un petit système pour IBM PC au bas prix de 695 $ US et Level 5 Research (Floride) vient d'annoncer la vente du squelette INSIGHT qui peut comprendre jusqu'à 400 règles au coût minime de 95 $ US.

Il est bon de noter que ces prix chutent rapidement. Par exemple, à sa sortie, le système écossais se détaillait à 2000 $ US et quelques semaines plus tard seulement, son prix de vente baissait à 695 $ US.

Enfin, mentionnons qu'il y aura probablement une tendance à commercialiser des squelettes spécialisés dans des domaines bien particuliers dont les approches sont communes (p.ex. surveillance de données, réparation, diagnostics).

Une mise en garde s'impose ici. L'acheteur devra être très prudent car un prix élevé ne correspond pas nécessairement à une qualité supérieure. Quelques squelettes sont dispendieux et peu puissants alors que d'autres sont peu coûteux et ont un rendement surprenant. Certains prix incluent la formation de l'utilisateur et la possibilité de faire plusieurs copies du programme alors que d'autres ne comprennent que le prix du système lui-même.

SYSTÈME	INSTITUTION	COÛT	COMMENTAIRES
a) squelettes			
ART (Automated Reasoning Tool)	Interference Corp.		Machine à raisonnement par inférence
Emycin	U. de Standford		Version sans connaissances de MYCIN
ES/P Advisor Expert	Expert System International U. de Rutgers	$1 300	
EXPERT-EASE	Expert Software International (Écosse)	$695	Pour IBM-PC
GEN-X	General Electric		
KES (Knowledge Engineering System)	Software Architecture and Engineering	($16 000 pour VAX) ($4 000 pour PC)	Utilisable sur VAX ou IBM-PC
LES (Lockheed Expert System)	Lockheed	N.D.	Usage interne seulement
MI	Teknowledge	$12 500	Fonctionne sur IBM-PC
Personal Consultant	Texas Instrument	$30 000	Squelette pouvant comprendre jusqu'à 400 règles
Rule Master	Radian		Fonctionne sur VAX ou IBM-PC
SI	Teknowledge (Palo Alto)	$50 000	Fonctionne sur VAX
SAGE	SPL (Royaume-Uni)		
SAVOIR _____ _____	ICI (R.V.) Epitek (Suède) Infologies (Suède)		
TIMM	General Research (Santa Barbara)		

SYSTÈME	DISTRIBUTION	COÛT	COMMENTAIRES
b) Langages FRL	MIT		Langage de représentation
HEARSAY III	U. of Southern California		Un système général basé sur HEARSAY II. Comprend un mécanisme pour déterminer le contexte et un tableau noir
KEE (Knowledge Engineering Environment)	Intelli Corp. (Palo Alto)	$60 000	Langage faisant appel au concept de cadres
KL-ONE	Bolt, Beranek and Newman		Langage de représentation
KRL	U. de Stanford		Langage de représentation
LOOPS	Xerox	Peut être copié pour un coût nominal	Langage " Object-oriented " pouvant traiter des règles
MRS	U. de Stanford	N.D.	Langage de représentation
OPS5	U. de Carnegie-Mellon Digital Equipment	$5 000	Langage construit à partir de LISP pour faciliter l'utilisation de règles
UNITS	U. de Stanford		Un langage de représentation et un système interactif d'acquisition de connaissances. Peut traiter les cadres et les règles
ROSIE	Rand Corp.		Langage basé sur des règles. Traduit de l'anglais à INTERLISP

Système	Institution	Coût	Commentaires
SNEPS	SUNY (Buffalo)		Langage de représentation
c) Autre			
AGE (Attempt To Generalize)	U. de Stanford		Système expert pour guider l'utilisateur dans l'élaboration d'un système
KAS	Stanford Research Institute		Supervise l'interaction avec un expert pour élaborer ou améliorer un système basé sur un réseau du type de PROSPECTOR
Krypton	Fairchild Corp.	N.D.	Combine un squelette pouvant décrire des objets avec une méthode pouvant faire des déclarations
RLL			Système expert pour aider à l'élaboration d'un autre système expert
TEIRESIAS	U. de Stanford		Système expert pour faciliter le transfert des connaissances d'un humain au système

Tableau XX. Outils pour élaborer un système expert

En plus de ces squelettes, il existe de nombreux systèmes accessoires comme des systèmes d'acquisition des connaissances. Il y a même des systèmes experts qui peuvent évaluer si un problème donné peut être abordé ou non par la technique des systèmes experts. La tableau XX en donne quelques exemples.

Enfin, on trouve aussi dans le commerce de nombreux langages de représentation facilitant l'élaboration de règles ou de toute autre forme de représentation (Tableau XX).

Tous ces outils sont complétés par les langages standards de l'intelligence artificielle.

Tout d'abord, il y a LISP (LISt Processing) dont les principales variantes sont INTERLISP (Xerox, Bolt Beranek and Newman, SRI, University of Southern California, Université de Stanford), FRANZLISP (universités de Berkeley et Carnegie-Mellon), MACLISP (MIT et Université de Standford), T (Yale), NIL (MIT), LOGLISP (Rochester) et COMLISP (COMmon LISP) (U. de Carnegie-Mellon, U. de Utah).

En Europe et au Japon, il semble que PROLOG (PROgrammation en LOGique) soit plus populaire. Au Canada, la compagnie Prologica vend une version de Prolog pour 3 500 $. Il existe une variété d'autres langages, comme SMALLTALK ou d'autres moins connus.

Les langages plus communs comme PASCAL ou FORTRAN peuvent aussi être utilisés mais ils rendent l'élaboration du système plus laborieuse.

Le choix d'un langage devrait dépendre de trois facteurs : de la connaissance qu'a le personnel d'un langage donné, de la disponibilité et de la nature du problème à résoudre.

3. Degré d'effort requis

Il est difficile d'évaluer l'effort nécessaire à l'élaboration d'un système expert car chaque cas est particulier. En 1965, il a fallu 38 années-personnes pour mettre au point DENDRAL. Toutefois, l'expérience acquise a permis de réduire considérablement les temps de parachèvement d'un système.

En 1982, on calculait qu'il fallait en moyenne
5 années-personnes pour mettre au point un système moyen.
Aujourd'hui, selon certaines sources, on estime qu'il faut

entre 7 mois-personnes et 5 années-personnes. En fait, les spécialistes s'accordent a dire qu'une version préliminaire, assez poussée pour évaluer si le projet est réalisable ou non, peut être construite entre 3 et 6 mois-personnes.

Il est important de noter qu'il est inutile de tenter d'accélérer le processus en ajoutant des années-personnes car cela amène des difficultés de coordination et des problèmes de communication. Par contre, si une équipe est trop réduite, il faut trop de temps pour coder le système.

L'équipe idéale comprend probablement de 2 à 5 personnes. Normalement, cette équipe sera composée d'un expert dans le domaine choisi, d'un spécialiste dans les systèmes experts et souvent d'un spécialiste dans les interfaces en langage naturel.

Un prototype suffisamment perfectionné pour être utilisé sur le terrain reviendra souvent à 100 000 $ pour un système important. Avant d'être utilisé de façon routinière, un système complexe aura coûté peut-être 1 million de dollars ou plus. On dit que Digital Equipment a dépensé quelque 10 millions de dollars pour XCON. En fait, tout dépend de la complexité et du rendement désirés.

Nous avons vu que les ordinateurs servant à mettre au point ces systèmes sont dispendieux. Si on ajoute les accessoires comme les modems, les imprimantes et autres, on parle probablement d'un coût variant entre 75 000 $ et 100 000 $ par chercheur.

En additionnant l'équipement, les logiciels et la main-d'œuvre, un prototype peut coûter de 1 à 3 millions de dollars, dans le cas d'un systène important. Un petit système peut être conçu pour moins de 90 000 $.

4. Conseillers

Au tableau XXIV, on trouvera une liste des firmes offrant des produits et des services reliés aux systèmes experts, firmes souvent citées dans les livres et magazines publiés sur les systèmes experts. Étant donné le nombre relativement élevé de firmes canadiennes œuvrant dans ce domaine, celles-ci ne seront mentionnées que dans la section de ce présent rapport réservée au Canada.

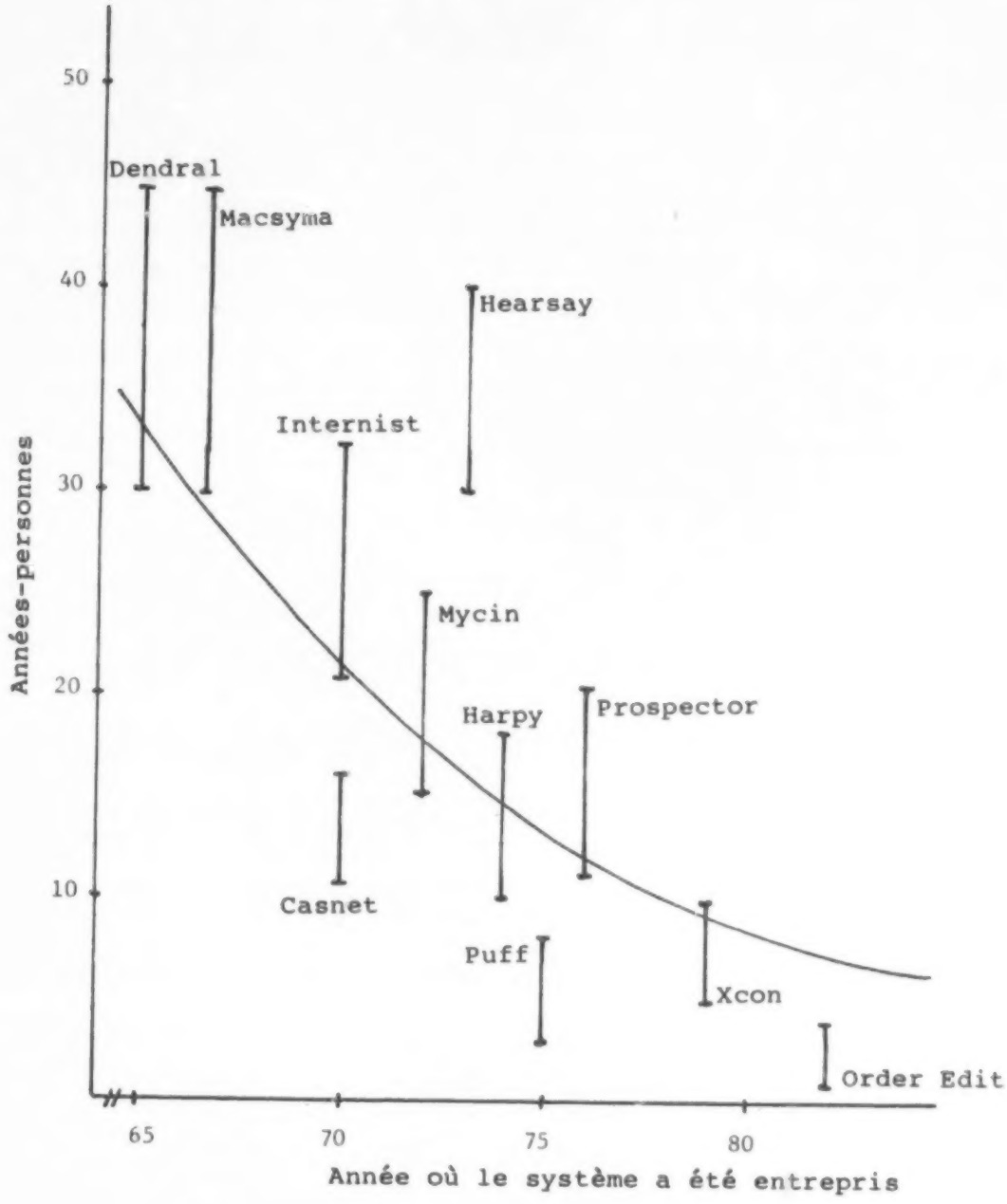


Tableau XXI. Temps nécessaire au parachèvement d'un système.

(Source : Sperry Corp.)

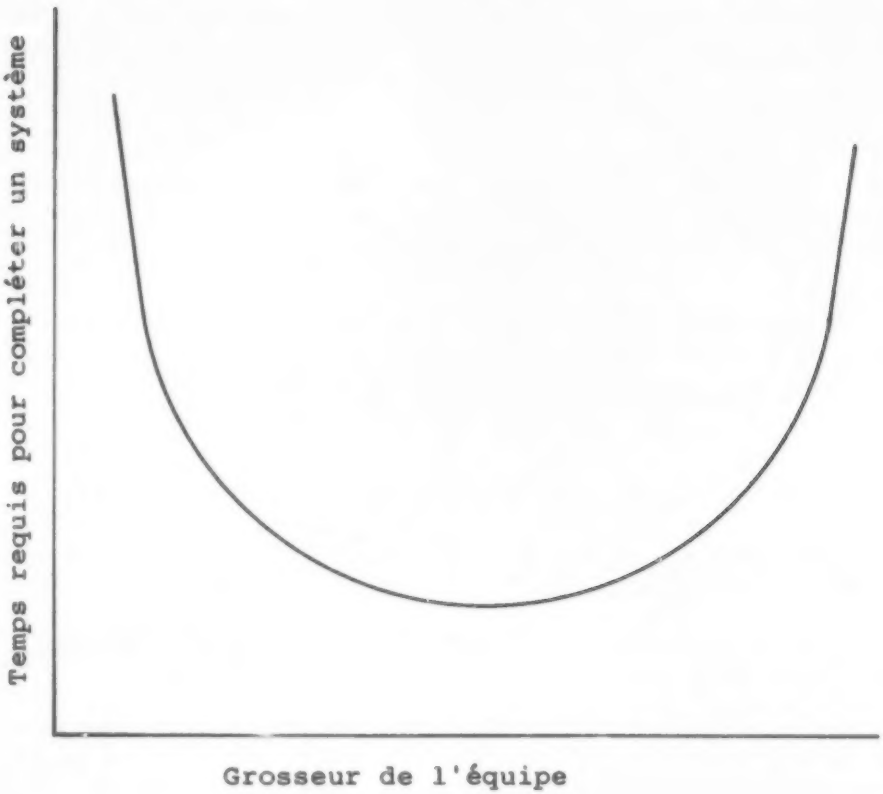


Tableau XXII. Temps nécessaire au parachèvement d'un système en fonction de l'importance de l'équipe de spécialistes.

Advanced Information and Decision Systems (Mountain View, Calif.)	(systèmes sur mesure)
Applied Expert Systems (Cambridge, Mass.)	(systèmes sur mesure)
Bolt, Beranek and Newman	
Brattle Research (Cambridge, Mass.)	(systèmes sur mesure)
Carnegie Group Inc. (Pittsburgh, Penn.)	(squelettes)
Cognitive Systems (New Heaven, Conn.)	(domaine financier)
Digital Equipment	(squelettes)
Eantech (Palo Alto, Calif.)	
EG&G (Idaho)	(domaine nucléaire)
Epitek (Suède)	(squelettes)
Expert System International (Royaume-Uni)	
Fairchild Advanced Research Laboratory	(squelettes)
Framentec (Voir Teknowledge)	(consortium avec une firme française)
General Electric	
General Resarch (Santa Barbara, Calif.)	
Helix (Royaume-Uni)	
Hewlett-Packard	
Human Edge Software (Calif.)	(systèmes basés sur les sciences humaines)

IBM	(domaine de l'informatique)
ICI (Royaume-Uni)	
Inference Corp.. (Los Angeles, Calif.)	(squelettes)
Infologics (Suède)	(squelettes)
IntelliCorp (Palo Alto, Calif.)	(squelettes)
IntelliGenetics (Palo Alto, Calif.)	(systèmes sur mesure et squelettes)
Intelligent Terminal (Edinbourg, Écosse)	
Isis Systems (Londres, Royaume-Uni)	
Lockheed	
MITRE Corp.	(domaine du trafic aérien)
Molecular Design Ltd. (Hayward, Calif.)	
Radian	
Rand Corp..	(squelettes)
Schlumberger-Doll Research	(domaine de l'industrie du pétrole)
Silogics (Los Angeles, Calif.)	(systèmes sur mesure)
Smart Systems Technology (McLean, Virginia)	(formation d'expert et systèmes sur mesure)
Software Architecture and Engineering (Arlington, Virginia)	(squelettes)
SPL (Abingdon, Royaume-Uni	

Stanford Research Institute	
Syntelligence (Menlo Park, Calif.)	(domaine bancaire)
Taylor Instruments, Division of Combustion Engineering (Rochester, N.Y.)	(contrôleurs pour usines)
Teknowledge (Palo Alto, Calif.)	(systèmes sur mesure) (squelettes) (formation de spécialistes)
Texas Instruments	(squelettes)
Verac (San Diego, Calif.)	

Tableau XXIII. Firmes offrant des produits et des services dans le domaine des systèmes experts.

ACTIVITÉS A L'ÉTRANGER

1. États-Unis

1.1 Activités gouvernementales

La plupart des entreprises gouvernementales dans ce domaine appartiennent au secteur militaire.

Le principal défenseur de l'intelligence artificielle en général, et des systèmes experts en particulier, est sans contredit DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Cette agence investira environ 600 millions de dollars sur cinq ans dans le cadre du programme Strategic Computing.

Ce programme vise à créer des ordinateurs militaires super intelligents grâce à de la recherche en micro-électronique, en nouvelles architectures d'ordinateurs et en intelligence artificielle. Les principaux champs de recherche seront les systèmes experts, la reconnaissance de la parole, les systèmes de vision et la compréhension du langage courant.

La première application d'un tel système dans le domaine militaire prendra la forme d'un système autonome capable de se déplacer seul et d'agir de facon indépendante. DARPA prévoit que ce sera un véhicule sans conducteur utilisé pour la reconnaissance ou la manipulation de munitions. Grâce à des capteurs visuels, il pourra se déplacer à 60 kilomètres à l'heure dans un rayon de 50 kilomètres. Ces capteurs collaboreront avec un système expert pour éviter des obstacles, identifier des repères et reproduire une carte du terrain.

En second lieu, on tentera de mettre au point un système capable d'assister les pilotes dans leur tâche, ce qui diminuera d'autant la charge de travail de ces derniers. Basé sur des systèmes experts, la reconnaissance de la parole et des technologies graphiques, ce type de système gérera les systèmes de vol et les systèmes d'armes au cours d'une bataille.

En fin, un système de gestion des combats sera conçu pour faire face à l'énorme complexité des systèmes modernes de gestion militaire. A titre d'exemple, le système prévoira les événements susceptibles de se produire, suggérera les actions à entreprendre, établira une planification détaillée

de ces actions et résoudra les conflits pouvant survenir entre les différents objectifs. Un système pour le contrôle du trafic aérien est déjà en voie de réalisation pour le porte-avions USS Carl Vinson.

La US Air Force s'intéresse particulièrement aux systèmes autonomes, à la robotique, aux conseillers électroniques, aux CCCI (commandement, contrôle, communication et intelligence) ainsi qu'à la simulation. La recherche se fait aux centres suivants : Air Force Office of Scientific Research, Rome Air Development Center, Avionics Laboratory, Flight Dynamics Laboratory, Human Resources Laboratory, Air Force Institute of Technology et Air Force Management Research Centre.

Les domaines d'intérêts de la US Navy sont très nombreux et variés. La recherche se fait surtout dans les centres suivants : Office of Naval Research, Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence, Naval Ocean Systems Center et Naval Underwater Systems Center, Naval Air Development Center, Naval Weapons Center et Naval Training Equipment Center.

Il semble que le seul centre d'activité de la US Army est le US Army Engineering Topographic Laboratories de Fort Belvoir, en Virginie.

Un autre programme du Département de la Défense, STARS (Software Technology for Adaptable Reliable Systems), vise à moderniser l'informatique militaire. Les systèmes basés sur des connaissances sont un des champs visés par ce programme. Les autres porteront sur les modules réutilisables, les langages de haut niveau, les systèmes capables de générer des logiciels d'application, d'architectures spécialisées d'ordinateur et de méthodologies standardisées.

D'autres fonds proviennent également des organismes suivants : National Institute of Health, National Science Foundation, National Library of Medecine, U.S. Geological Survey et la NASA.

1.2 Activités universitaires

Les principales universités œuvrant dans le domaine des systèmes experts sont : Stanford, Rutgers, Carnegie-Mellon et le Massachusset Institute of Technology. Les autres sont le California Institute of Technology, le Harvey Mudd

College, l'Illinois Institute of Technology, l'Université d'État de la Caroline du Nord, l'Institut Polytechnique Rennselaer, l'Université d'État de l'Ohio, les universités de Syracuse, Berkeley, du Minnesota, du New Hampshire, Cornell, Duke, de Pittsburgh, de l'Illinois et de Pennsylvanie.

1.3 Activités dans le secteur privé

En 1983, 13 firmes créaient un centre de recherche coopératif, le Microelectronics and Computer Technology Corporation situé à Austin (Texas) et dirigé par l'amiral Inman. Ce faisant, chaque firme s'engageait à participer à un minimum d'un projet de recherche d'une durée d'au moins trois ans. Les firmes fondatrices sont : Advanced Micro Devices, Allied, Control Data, Digital Equipment, Harris, Honeywell, Martin-Marietta, Mostek, Motorola, NCR, National Semiconductor, RCA et Sperry. Le premier budget d'exploitation du centre s'élevait à 50 millions de dollars US.

La recherche y porte sur quatre grands thèmes : la micro-électronique, les logiciels, la CFAO et les nouvelles architectures d'ordinateur. Ce dernier domaine comprend les spécialités suivantes : l'intelligence artificielle et les systèmes experts, les interfaces homme-machine (y compris la reconnaissance de la parole et des images), la gestion des banques de données et le traitement en parallèle.

Le Stanford University Center for Integrated Systems est un autre centre coopératif créé sur une base tripartite (université-industrie-gouvernement). L'intérêt accordé aux systèmes experts se traduit par le désir de concevoir des systèmes capables de participer à la conception, la vérification et à la correction des circuits intégrés à haute intégration. Les autres activités du centre sont plutôt concentrées sur les puces elles-mêmes. Les compagnies participantes sont : Digital Equipment, Fairchild, GE, General Telephone and Electronics, Gould/AMI, Hewlett-Packard, Honeywell, Intel, IBM, ITT, Mosanto, Motorola, Northrop, Phillips/Signetics, Tektronic, Texas Instruments, TRW, United Technologies et Xerox.

Parmi les compagnies qui font de la recherche dans le domaine, il y a : Control Data, Digital Equipment, Eaton, General Electric, Harris, Hewlett-Packard, Honeywell, IBM, Martin-Marietta Aerospace, National Cash Register, RCA, Sperry, Westinghouse, Amoco, Bolt Beranek and Newman, Bell Labs, Computer Thought (Texas), GM, Hughes, Machine Intelligence (Sunnyvale, Calif.) TRW et toutes les autres citées dans ce rapport.

2. Japon

Le principal programme japonais en intelligence artificielle est le Programme d'ordinateur de cinquième génération lancé en avril 1982 avec la création de l'Institute for New Generation Computer Technology (ICOT).

Ce programme est parrainé par MITI (Ministry of International Trade and Industry) qui versera environ 500 millions de dollars can. pendant les dix ans du programme en question; parallèlement, l'industrie déboursera un montant équivalent.

Ce programme vise ainsi à créer un ordinateur possédant certaines ressemblances avec l'humain (raisonnement par inférence, capacités d'association et d'apprentissage par l'exemple). Ce micro-ordinateur agira comme système expert auprès de l'usager. Il pourra avoir accès à de gros ordinateurs et à des banques de connaissances externes grâce à l'utilisation de réseaux de télécommunications.

Quelles seront le caractéristiques d'un ordinateur de cinquième génération ? Il sera doté du sens de la vision, il pourra proposer différents moyens de résoudre un problème spécialisé et il pourra diagnostiquer et corriger lui-même certains problèmes. Il pourra s'autoprogrammer à partir des objectifs à atteindre et d'une description sommaire du processus à utiliser pour atteindre cet objectif.

Si, pour beaucoup, un tel ordinateur tient de l'utopie, il n'en demeure pas moins que la réalisation même partielle de ces objectifs constituerait un pas de géant.

Les trois premières années de ce programme ont entièrement été subventionnées par MITI qui a versé la somme de 45 millions de dollars US. Pendant cette période, les spécialistes ont revu, évalué et restructuré les connaissances existant dans ce domaine. Quelques prototypes de certains sous-systèmes ont été mis au point.

Les trois années suivantes seront consacrées au parachèvement des sous-systèmes ainsi qu'à la mise au point des algorithmes et des architectures de base.

La fin du programme verra l'intégration des deux phases prédédentes et l'élaboration des logiciels d'application pour le premier prototype de l'ordinateur de cinquième génération.

La recherche axée sur le matériel prendra deux directions : elle s'attardera d'abord sur une machine à raisonnement par inférence fonctionnant en parallèle plutôt que de façon

séquentielle comme tous les ordinateurs actuels et, ensuite, sur une machine basée sur les connaissances, c'est-à-dire une machine spécialisée dans la gestion d'énormes banques de connaissances de l'ordre de 100 milliards de multiplets (" bytes ").

La recherche axée sur le logiciel portera sur un système de résolution de problèmes, un système de raisonnement par inférence, un système de gestion des connaissances, sur la programmation automatique, ainsi que sur des interfaces homme-machine intelligentes.

Le tableau XXIV représente schématiquement l'ordinateur visé.

Le centre ICOT fonctionne grâce aux dons des compagnies suivantes : Fujitsu, Hitachi, Matsushita, Mistsubishi, NEC, Oki, Sharp et Toshiba. En plus de leur appui financier, ces firmes ont fourni, avec la Nippon Telephone and Telegraph et le laboratoire électro-technique du MITI (Ministry of International Trade and Industry), 42 chercheurs de haut calibre.

3. Europe

La Commission des communautés européennes, dans le but de reconstruire sa base technique et de renverser la détérioration de son déficit commercial en électronique, lançait en février 1984 son fameux programme ESPRIT (European Strategic Programme for R&D in Information Technology).

La première phase du programme sera répartie sur cinq ans et coûtera environ 1,5 milliard de dollars can. dont 50 % seront financés par la Commission. On décidera de la deuxième phase lors d'une révision en 1988. Il est prévu qu'environ 2000 années-personnes seront impliquées chaque année, ceci constituant une concentration énorme au niveau de la recherche.

Tous les projets soumis doivent engager au moins deux compagnies de deux pays différents et porter sur de la R. et D. précompétitive. De cette façon, on espère atteindre un esprit de coopération internationale réel. Les douze firmes suivantes sont déjà impliquées dans le programme : General Electric (Angleterre), International Computers (Angleterre), Plessey (Angleterre), Compagnie Générale d'Électricité (France), Bull (France), Thompson-Brandt (France), AEG-Telefunken (RFA), Nixdorf (RFA), Siemens (RFA), Phillips (Hollande), Olivetti (Italie) et Societa Torinese Esercizi Telefonici (Italie).

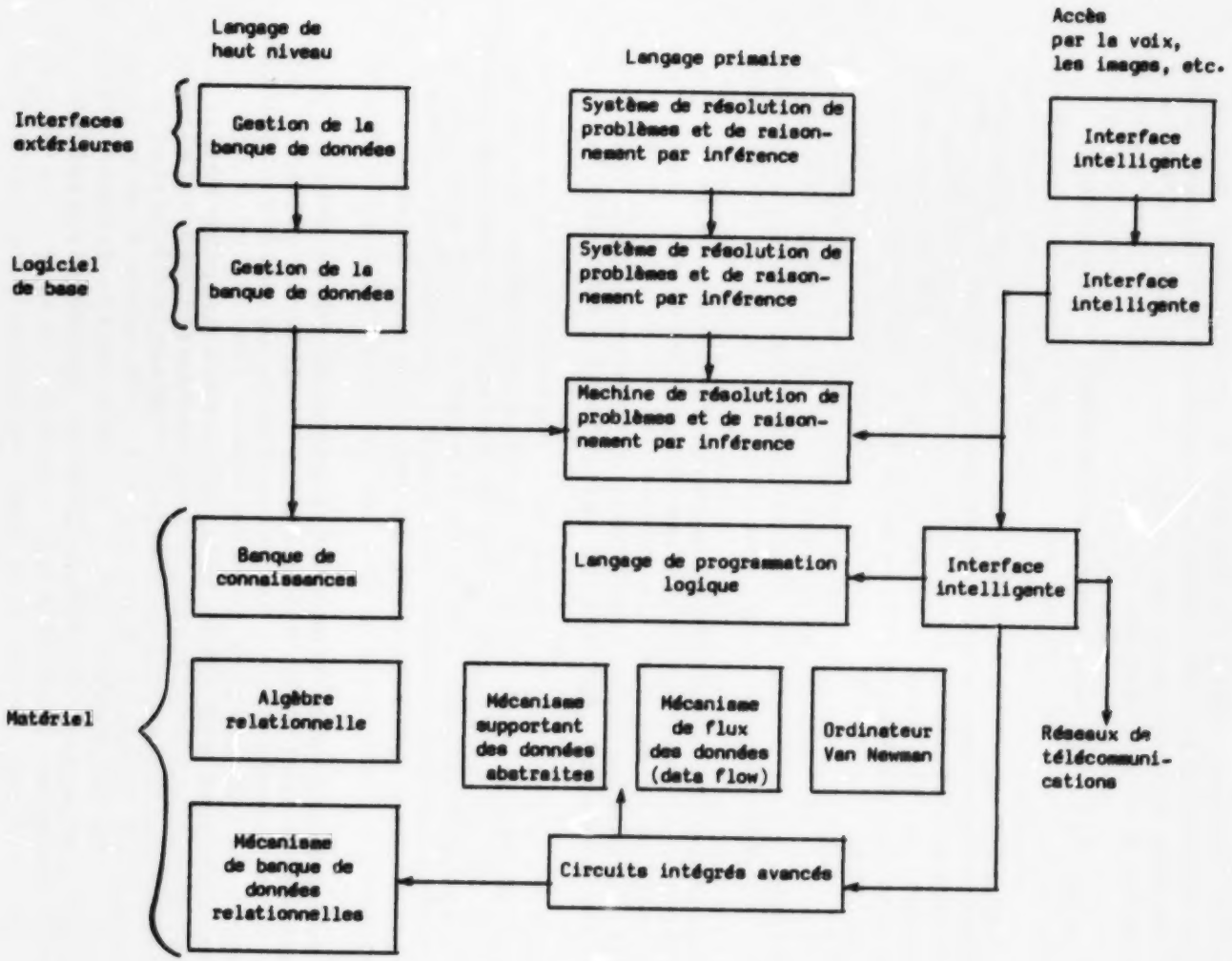


Tableau XXIV. Architecture de l'ordinateur de cinquième génération.

(Source : Technocrat, janvier 1982.)

Les objectifs précis d'ESPRIT sont :

- d'améliorer les interfaces homme-machine afin de rendre les ordinateurs plus faciles à utiliser;

- de rendre les machines plus intelligentes et par là même d'éviter à l'utilisateur de s'occuper des détails;

- d'intégrer tous les réseaux de communications;

- d'améliorer les systèmes au niveau de la fiabilité et de la sécurité.

Ces objectifs ne pourront être atteints qu'en réalisant des progrès énormes en matière de logiciels et de matériel.

C'est ainsi qu'on a identifié cinq thèmes de recherche. Trois d'entre eux sont centrés sur des technologies obligatoires de progrès : la micro-électronique de pointe (p.ex. des géométries inférieures au micron), la technologie des logiciels (p.ex. modularité et automatisation du processus) et le traitement avancé de l'information. Les deux autres thèmes concernent les applications spécifiques de la technologie à certains domaines : l'automatisation au bureau et la fabrication gérée par l'informatique.

Le thème qui nous intéresse est celui du traitement avancé de l'information. Il comprend quatre pôles : le génie de la connaissance, la reconnaissance des formes et les interfaces homme-machine, les nouvelles architectures d'ordinateur et les méthodes de conception assistée par ordinateur.

Les objectifs du pôle " génie de la connaissance " sont d'acquérir :

> " les outils et les technologies nécessaires à la pratique du génie de la connaissance, pour permettre une réalisation, commercialement et socialement acceptable, des applications des systèmes cognitifs, parmi lesquels on compte les systèmes experts, les supports décisionnels et l'instruction assistée par ordinateur ".
>
> (Projet de décision du conseil)

La recherche portera sur les techniques de représentation de la connaissance et du raisonnement par inférence, les techniques d'acquisition de la connaissance et d'apprentissage, la manipulation de la connaissance, le dialogue et le langage naturel, les langages d'application, les interprètes utilisés dans les formes avancées de représentation de la connaissance, les systèmes cognitifs et leur mesure ainsi que sur l'emploi des systèmes avancés.

Les autres thèmes de recherche font eux aussi appel aux systèmes experts. A titre d'exemple, dans la technologie du logiciel, on trouve le projet suivant : l'élaboration de logiciels basés sur l'emploi de systèmes experts.

3.1 Grande-Bretagne

Dans le domaine de l'intelligence artificielle en général, le principal programme gouvernemental est le programme Alvey qui suscitera des dépenses de l'ordre de 350 millions de livres sterling sur cinq ans. Les universités effectueront des recherches pour 50 millions de livres; ce montant proviendra à 100 % du ministère de l'Éducation et de la Science. Le ministère de la Défense et l'industrie de la défense verseront une même somme pour qu'on puisse effectuer des recherches jusqu'à concurrence de 80 millions de livres. Le ministère du Commerce et de l'Industrie et l'industrie civile accorderont l'un et l'autre 110 millions de livres. La part du gouvernement s'établira donc à 200 millions de livres sterling.

Des recherches seront menées en tenant compte de quatre priorités : i) les circuits à très grande intégration, ii) le génie informatique, iii) les interfaces homme-machine et iv) les systèmes intelligents basés sur des connaissances. Environ 40 millions de livres sterling seront consacrées à ce dernier thème.

Une trousse d'introduction a été préparée par le National Computing Centre pour mieux faire connaître cette technologie au public britannique. Vendu pour quelques centaines de dollars, cette trousse comprendra même un squelette simple de système expert. Quant aux firmes, elles peuvent recourir à des centres gouvernementaux de formation pour le perfectionnement de leur personnel.

Il existe également une association fondée spécialement pour les systèmes experts, la British Society of Expert Computer Systems, présidée par le très réputé Alex D. Agapayeff.

De nombreux clubs se sont formés. Un d'entre eux, par exemple, rassemble une vingtaine de firmes qui, appuyées par le programme Alvey, ont commandé un système expert spécialisé dans le contrôle de la qualité d'une usine d'éthyle-oxalate.

Les universités suivantes font de la recherche dans le domaine des systèmes experts : Édimbourg, Essex, Sussex, Cambridge, la polytechnique du South Bank et l'Open University. D'autres institutions comme la Imperial Cancer Research Foundation, le ministère de la Défense, le ministère de l'Industrie et du Commerce, effectuent également de la recherche.

A part les quelques firmes que nous avons déjà mentionnées au cours de ce rapport, il y a également Marconi, Knowledge -Based Systems, Logica VTS et Plessey.

Plusieurs vidéo-cassettes, préparées par les autorités britanniques, sont disponibles auprès de la Open University.

3.2 République fédérale d'Allemagne

En 1984, le gouvernement de la République fédérale d'Allemagne octroyait 3 milliards de marks au ministère de la Recherche et de la Technologie pour effectuer des recherches sur les technologies de l'information, pendant une période de cinq ans. Les mesures choisies incluent des mesures fiscales d'encouragement, du capital de risque, des achats gouvernementaux et des mesures pour améliorer la coopération entre les laboratoires gouvernementaux, universitaires et industriels.

Les champs de recherche choisis sont les suivants :

- les circuits-intégrés (600 millions de marks);
- l'automatisation industrielle (530 millions de marks);
- les micropériphériques (320 millions de marks);
- les réseaux digitaux à large bande et la photonique (260 millions de marks);
- les nouvelles composantes (200 millions de marks);
- le traitement de la connaissance et la reconnaissance des formes (200 millions de marks);
- les logiciels de conception assistée par ordinateur (160 millions de marks);

- les nouvelles architectures d'ordinateur (160 millions de marks);

- la création d'un réseau de recherche (100 millions de marks);

- la recherche de base (100 millions de marks);

- la CAO appliquée aux circuits intégrés (90 millions de marks);

- les composantes-clés (90 millions de marks);

- l'optique intégrée (90 millions de marks); et

- la télévision à haute résolution (60 millions de marks).

Les diverses institutions de recherche sont le Centre national de recherche en mathématiques et en informatique à Berlinghoven, près de Bonn, les instituts Fraunhofer de Stuttgart et Aachen et les universités de Hambourg, de Kaiserslauten et de Stuttgart.

Les compagnies suivantes font de la recherche dans les applications des systèmes experts aux procédés et à la production : Siemens, Rank Xerox, Digital Equipment, Triumph Adler et Nixdorf.

3.3 France

Des recherches sont en cours au CNET (Centre national d'études des télécommunications), au CERT (Centre d'études et de recherches techniques), au Commissariat de l'énergie atomique, au CERFIAT, à l'Institut de programmation de Paris, à l'Institut de mathématiques appliquées de Grenoble, au Laboratoire de recherche en informatique d'Orsay, au CRIN (Centre de recherche en informatique de Nancy), à l'INRIA (Institut national de la recherche en informatique et en automatique), à l'IRISA (Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires), au LAAS (Laboratoire d'automatique et d'analyse de système) de Toulouse, au Laboratoire de recherche en informatique de l'université de Paris-Sud et à l'université de Marseille.

Les compagnies suivantes sont actives dans le domaine des systèmes experts : Compagnie générale d'électricité, Cap Sogeti, Compagnie d'informatique militaire spatiale et aéronautique, Elf-Aquitaine, Thomson CSF, CII-Honeywell-Bull, Seri Renault, Matra et Schlumberger.

L'Association d'intelligence artificielle et de simulation est la principale association dans le domaine des systèmes experts.

3.4 Hollande

Les systèmes experts viennent tout juste de susciter un certain intérêt en Hollande. L'Université libre d'Amsterdam, l'Université de Delft, Phillips, la filiale de Shell ainsi que quelques petites firmes de logiciels sont les principaux lieux où une activité a été remarquée.

3.5 Autres

La recherche, en Italie, est très fragmentée; il y a peut-être une cinquantaine de chercheurs pour tout le domaine de l'intelligence artificielle. Les principaux centres semblent être le Centre de recherche en télécommunications (ELSAG) et la filiale de Honeywell.

La Suède a, quant à elle, une petite équipe très dynamique qui œuvre aux universités de Linkoping, Uppsala et Stockholm. Au moins une compagnie est connue : Norsk Data.

En Belgique, on n'a recensé qu'un seul lieu d'activité, l'Université libre de Bruxelles.

En U.R.S.S., l'Académie des sciences de Moscou a lancé son programme d'ordinateur de cinquième génération pour une période de cinq ans au coût d'environ 100 millions de dollars US.

ACTIVITÉS CANADIENNES

L'intérêt suscité par l'intelligence artificielle et plus spécifiquement par les systèmes experts est relativement nouveau au Canada.

En 1982, Alain Letendre, du ministère d'État chargé des Sciences et de la Technologie, faisait circuler une version préliminaire du rapport intitulé La prochaine génération de logiciels : l'intelligence artificielle. L'année suivante, le Conseil des sciences du Canada commandait quelques études dans le même domaine. Ce même organisme a depuis mis sur pied deux séminaires sur le sujet. La même année, le ministère des Communications commandait, conjointement avec le Secrétariat d'État, une gigantesque étude sur le même sujet auprès de la compagnie Cognos d'Ottawa, étude dont une version abrégée sera publiée cette année.

L'année 1984 a été le témoin de nombreuses activités. En septembre, il y a eu une conférence sur les ordinateurs de cinquième génération et les systèmes experts à Calgary; en octobre, un séminaire sur les ordinateurs de cinquième génération a été organisé à l'Université de Toronto et, en novembre, le colloque " Intelligence artificielle et systèmes experts ", mis sur pied par le Centre d'activités en conception assistée par ordinateur et le Centre de cours intensif de l'École polytechnique de Montréal, s'est déroulé à Montréal.

Depuis, on assiste à un déluge de séminaires, de colloques, de cours et de démonstrations.

1. Activités au niveau fédéral

Au ministère de la Défense, on essaie d'appliquer la technologie des systèmes experts aux systèmes sonars pour combattre la fatigue et la perte d'attention. Au Defence Research Establishment de Halifax, on tente de l'appliquer à l'interprétation des signaux acoustiques.

Au Conseil national de recherches, on a commencé à mettre au point un système expert dans le domaine du moulage des plastiques par injection. Un autre système, actuellement en cours de conception, permettra de robotiser la soudure. Un système pour diagnostiquer les défauts cardiaques est aussi en cours d'élaboration. Enfin, on a entrepris des recherches pour construire un système expert capable d'établir des stratégies de conception qui pourrait être utilisé en génie, en architecture et en design industriel.

Le Centre de recherche en communications du ministère des Communications entreprendra d'ici peu la réalisation d'un système expert axé sur le diagnostic des dommages cérébraux chez les jeunes enfants.

Par l'intermédiaire de son programme de subventions thématiques, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada appuie la recherche universitaire en intelligence artificielle. Dans le domaine des télécommunications et de l'informatique, par exemple, presque un demi-million de dollars ont été consacrés aux systèmes experts eux-mêmes, pour 1984-1985.

Le ministère des Transports a récemment entrepris une revue générale des applications possibles des systèmes experts au secteur des transports. Ce ministère explore aussi la possibilité de créer des systèmes devant être utilisés pour l'évaluation de la stabilité des camions à remorque, le contrôle aérien, l'entretien du matériel et le contrôle des inventaires.

De nombreux autres ministères ont identifié d'autres domaines où les systèmes experts pourraient être utilisés. A titre d'exemple, le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources a montré de l'intérêt pour l'applications des systèmes experts aux domaines suivants : la prospection minérale, la paléontologie, l'interprétation sismique, la télédétection et l'interprétation des données de forage.

2. Activités au niveau provincial

En Alberta, au Alberta Research Council, on est en train de mettre au point un système expert prévoyant les tempêtes. Un autre, également en cours de réalisation, sera appliqué au domaine de la robotique.

3. Recherche universitaire

L'université Simon Fraser effectue des travaux de recherche dans à peu près tous les domaines de l'intelligence artificielle. Le projet-clé de l'université est le Automated Academic Advisor, un projet à long terme qui cherche à intégrer le concept de banque de données dynamique aux techniques de représentation des connaissances et à la compréhension du langage naturel pour en faire un système expert d'exploitation.

L'Université de Colombie-Britannique intègre la vision artificielle à la représentation des connaissances pour l'application de la télédétection à la foresterie.

A l'Université d'Alberta, en coopération avec l'Alberta Research Council, un système expert a été conçu pour prévoir les tempêtes de grêle. Un autre projet de recherche consiste à étudier l'ordre optimal dans lequel les connaissances devraient être ajoutées à un système expert.

A l'Université de Saskatchewan, on s'intéresse aux applications des systèmes experts à l'enseignement assisté par ordinateur. Le projet SCENT, par exemple, comprend un système expert qui connaît le genre d'erreurs normalement commises par les élèves.

A l'Université de Toronto, la recherche est dirigée par M. Tsotsos. Il s'intéresse à l'utilisation des systèmes experts dans le domaine médical et à la mise au point d'une nouvelle génération de systèmes experts capables de raisonner par analogie et pouvant manipuler de l'information qui change. Ce groupe vient de recevoir une subvention de 1,5 million de dollars du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie. Cette équipe a aussi conçu le système ALVEN qui permet d'analyser les radiographies du ventricule gauche. Un autre système, CAA, détecte les arythmies dans les électrocardiogrammes.

Les intérêts de l'université Western Ontario se concentrent dans le domaine des petits systèmes experts.

Le groupe de l'Université d'Ottawa est dirigé par M. Skuce qui a entrepris la réalisation d'un système capable de répondre à des questions concernant des règlements, des caractéristiques et des directives. Le système sera par la suite transformé en conseiller fiscal. Dans le département de génie électrique, on met au point un système capable d'analyser des photos de forêts prises par télédétection.

A l'Université de Montréal, le groupe INCOGNITO (INformatique COGNITive) désire entreprendre des recherches en systèmes experts, en programmation automatisée et en langage naturel.

A l'Université Dalhousie, M. Horacek s'intéresse aux applications des systèmes experts au diagnostic médical alors qu'à la Technical University of Nova Scotia, on s'intéresse à l'utilisation de la programmation logique dans les systèmes experts.

4. Activités dans l'industrie

Comme partout ailleurs, l'industrie canadienne du système expert vient tout juste de faire son apparition et elle est constituée en grande partie de très petites compagnies. Toutefois, si on tient compte de la faible population de ce pays par rapport à celle des États-Unis, il semble que l'industrie canadienne soit, toute proportion gardée, au moins aussi prospère que celle des États-Unis, comme on peut le constater au tableau XXV.

Exception faite de Northern Telecom, qui a entrepris de mettre au point un système pour surveiller et corriger une chaîne de fabrication de circuits intégrés, peu de compagnies canadiennes sont impliquées dans la mise au point de systèmes experts destinés à être utilisés par la compagnie même. La firme d'experts conseils Cognos Incorporated a toutefois découvert quelques firmes intéressées par les systèmes experts (Tableau XXVI).

Il est assez évident que le niveau de diffusion de cette technologie est très faible si on le compare à celui des États-Unis. En effet, comme on aura pu le constater tout au long de ce rapport, les grandes sociétés américaines sont impliquées dans cette technologie que ce soit IBM, Hewlett-Packard, Lockheed ou Générale Électrique. Partout au sein de l'OCDE, on remarque l'intérêt accordé aux systèmes experts par des sociétés étrangères à l'électronique comme Schlumberger et Elf-Aquitaine, pour ne nommer que deux entreprises du secteur pétrolier.

5. Autres activités du secteur privé

Le Canadian Institute for Advanced Research (une société privée à but non lucratif) a fait de la recherche en intelligence artificielle une de ses priorités en créant le programme Artificial Intelligence, Robotics and Society. A cette fin, cet institut consacrera quelque 10 millions de dollars de 1983 à 1988. Ses thèmes de recherche portent sur la vision artificielle (Université de Colombie-Britannique), les capteurs en robotique (Université McGill) et les systèmes experts (Université de Toronto). Pour plus de renseignements, on peut contacter son président, M. Fraser Mustard au numéro suivant : (613) 963-1380.

6. Associations

La seule association canadienne spécialisée en intelligence artificielle est la Canadian Society for Computational Studies of Intelligence (Société canadienne pour les études de l'intelligence par ordinateur), 243, rue College, 5e étage, Toronto (Ontario) M5T 2Y1.

Elle a été fondée en 1973 (ce qui en fait la plus vieille association nationale au monde en intelligence artificielle) par une trentaine de chercheurs et elle compte maintenant 300 membres. Elle constitue un groupe spécialisé au sein de la Canadian Information Processing Society (CIPS).

Alan Campbell C.P. 2541 Smithers (Colombie-Britannique) V0J 2N0	Squelette
Atletic Inc. Nouvelle-Écosse (902) 424-6580	Système expert pour faciliter l'interprétation de données géophysiques dans le domaine pétrolier
Applied AI Systems C.P. 13550 Kanata (Ontario) (613) 592-0084	Systèmes experts sur mesure Squelettes (APES) Formation Langage naturel Micro-PROLOG Golden Common Lisp Consultation
Canadian Artificial Intelligence Products Corporation (CAIPC) 106, rue Colonnade, bureau 220 Nepean (Ontario) K2E 7P4 (613) 727-0082	Systèmes experts sur mesure Langage naturel Traduction informatisée Consultation
Cognicom 20, rue Richmond Salle 425 Toronto (Ontario) M5C 2R9 (416) 366-4857	Consultation
Control Data Mississauga (Ontario)	Une machine spécialisée dans le traitement des connaissances est en voie de réalisation
Dogwood AI Research 1826, 1re Avenue ouest Vancouver (Colombie-Britannique) V6J 1G5	Système expert en foresterie Système expert pour le contrôle des avalanches

Expert Systems Corp. Vancouver (Colombie-Britannique)	Système pour le traitement des signaux
ForceTen Enterprises Inc. Nouvelle-Écosse (902) 453-0040	Système expert appliqué à la formation assistée par ordinateur
Gomi AI Systems Kanata (Ontario)	Applications au domaine médical
Intralogic Kitchener (Ontario)	Prolog
LISP Canada Inc. 5252, boul. de Maisonneuve ouest Montréal (Québec) H4A 3S5 (514) 487-7063	LISP Machines LM-PROLOG ZETALISP-PLUS
Logicware Inc. 1000, av. Finch ouest Salle 600 Downsview (Ontario) M3J 2V5 (416) 665-0022	MPROLOG
MacDonald Dettwiler and Associates Airport Executive Park 3751, chemin Shell Richmond (Colombie-Britannique) V6X 2Z9 (604) 278-3411	Système expert pour le traitement des images
N.W. Artificial Intelligence Vancouver (Colombie-Britannique)	----------
Northern Telecom 33, chemin City Centre Mississauga (Ontario) L5B 3A2	Un système expert est en voie de réalisation pour la surveillance et la correction d'une chaîne de fabrication de circuits intégrés

Texas Instruments	Ordinateur Explorer Squelette (Personal Consultant)
Unitek Technologies 10751, chemin Shellbridge Salle 115 Richmond (Colombie-Britannique) V6X 2W8 (604) 276-2429	Applications à la comptabilité et au tourisme
Xerox Canada Inc. 703, chemin Don Mills Don Mills (Ontario) M3C 1S2 (416) 429-6750	Xerox 1108 Interlisp-D

Tableau XXV. Liste des principales compagnies canadiennes impliquées dans les systèmes experts.

Alcan	Contrôle des procédés Robots intelligents
Banque de Montréal	Conseiller financier
Crack Resources	Analyse de données sismiques
Imperial Oil	Programmation d'une raffinerie Amélioration du système de distribution Analyse sismique
Noranda	Conception de mines à ciel ouvert
Ontario Hydro	Contrôle des procédés
Spar Aerospace	Bras spatial intelligent

Tableau XXVI. Exemples de possibilités d'utilisation des systèmes experts dans quelques compagnies canadiennes.

(Source : Cognos Inc.)

BIBLIOGRAPHIE

Campbell A.N., Hollister V.F., Duda R.O. et Hart P.E. — " Recognition of A Hidden Mineral Deposit by An Artificial Intelligence Program ", Science, 3 septembre 1982, p. 927-928.

D'Abrosio B.D. — " Expert Systems: Myth or Reality ? ", Byte, janvier 1985, p. 275-282.

Duda R.O. et Shortliffe E.H. — " Expert Systems Research ", Science, 15 avril 1983, p. 261-268.

Evanczuk S. et Manuel T. — " Practical Systems Use Natural Languages and Store Human Expertise ", Electronics, 1er décembre 1983, p. 139-145.

Fawcette J. — " Pentagon Push for Software Development Tools ", High Technology, octobre 1983, p. 78-79.

Feigenbaum E.A. et McCorduk P. — The Fifth Generation - Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World, Addison-Wesley, 1983.

Fox J. — " Computers Learn The Bedside Manners ", New Scientist, 29 juillet 1982, p. 311-313.

Gellaire H. — " Les systèmes experts : une percée de l'intelligence artificielle ", La Recherche, mai 1982, p. 644-645.

Gevarter W.B. — An Overview of Expert Systems, U.S. Department of Commerce, mai 1982, 67 p.

Gevarter W.B. — " Expert Systems: Limited but Powerful ", IEEE Spectrum, août 1983, p. 39-45.

Gevarter W.B. — Expert Systems, Proceedings of the Army Conference on Application of Artificial Intelligence to Battlefield Information Management, avril 1983, p. 193-206.

Joseph E. — " A Knowledge-Based Era ", Computer World, 1er novembre 1982, p. 101-108.

Kinnucan P. " Computers That Think Like Experts ", High Technology, janvier 1984, p. 30-42.

Lenat D.B. " Computer Software for Intelligent Systems ", Scientific American, septembre 1984, p. 204-213.

Letendre A. La prochaine génération de logiciels : l'intelligence artificielle, Ministère d'État chargé des sciences et de la technologie, 1983, 139 p.

Lineback J. " Lisp Machine Provides A Shell for Industrial AI Applications in One of First Expert Systems To Go To Work ", Electronics Week, 27 août 1984, p. 33-36.

Martins G.R. " The Overselling of Expert Systems ", Datamation, novembre 1984.

McCulla G. et Cercone, N. Directions for Canadian Artificial Intelligence, Canadian Society for Computational Studies of Intelligence, 1984, 81 p.

Miller R.K. The 1984 Inventory of Expert Systems, Technical Insights, 1984, 183 p.

Myers E. " Machines That Lisp ", Datamation, septembre 1981, p. 105-108.

Sharkin J.N. " Expert Systems: The Practical Face of Artificial Intelligence ", Technology Review, novembre-décembre 1983, p. 72-78.

Sheil B. " Family of Personal Lisp Machines Speeds AI Program Development ", Electronics, 3 novembre 1983, p. 153-156.

Shortliffe E.H. Trends in Artificial Intelligence Research and Applications, Rapport présenté au Comité de l'OCDE sur l'informatique et les communications, octobre 1983, 39 p.

Sweitzer D.L.S. Artificial Intelligence - The State-Of-The-Art, document preparé pour le Conseil des sciences du Canada, février 1982, 70 p.

Tate P. " The Blossoming of European AI ", Datamation, 1 novembre 1984, p. 85-88.

Wallich P. " Progress Is Reported in Expert Systems and Software to Build Such Systems and in Object-Oriented Programming ", IEEE Spectrum, janvier 1984, p. 47-49.

Webster R. et Miner L. " Expert System - Programming Problem Solving ", Technology, janvier-février 1982, p. 63-73.

Zadeh L.A. " Making Computers Think Like People ", IEEE Spectrum, août 1984, p. 26-32.

AI Trends '85, DM Data, 1985, 136 p.

" Artificial Intelligence - The Second Computer Age Begins ", Business Week, 8 mars 1982, p. 66-75.

" Experts Spit over Future of Artificial Intelligence ", New Scientist, 18 février 1982, p. 440.

" Fifth Generation Computer Project ", Technocrat, janvier 1982, p. 29-47.

Identifying Research Areas in The Computer Industry to 1995, Noyes Publications, Hoboken, 1984, 154 p.

" Lisp Machine Provides a Shell for Industrial AI Applications in One of the First Expert Systems to Go to Work ", Electronics Week, 27 août 1984, p. 34-36.

" Special Issue on Knowledge Representation ", IEEE Computers, octobre 1983.

Strategic Computing, DARPA, Washington, octobre 1983, 69 p.

The AI Business - The Commercial Uses of Artificial Intelligence, MIT Press, 1984.

The Emerging Artificial Intelligence (AI) Industry, DM Data, août 1983.

" TI's AI Machine Enters Market Already A Best Seller ", Electronics Week, 8 octobre 1984, p. 19-20.

" Tomorrow's Computers ", IEEE Spectrum, novembre 1983, 120 p.

" When Bugs Cause The Computer to Crash, Prime's Prolog-Based Doc Tells What's Up ", Electronics, 23 février 1984, p. 52.

" Why Can't A Computer Be More Like A Man ", The Economist, 9 janvier 1982, p. 77-81.

" Why Computers Can't Outthink The Experts ", Fortune, 20 août 1984, p. 105-118.